



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA

FUNDAMENTOS DE LA INGENIERÍA DE RIEGO



Absalón Vásquez V.
Issaak Vásquez R.
Cristian Vásquez R.
Miguel Cañamero K.

FUNDAMENTOS DE LA INGENIERÍA DE RIEGOS

ABSALON VASQUEZ V.
ISSAAK VASQUEZ R.
CRISTIAN VASQUEZ R.
MIGUEL CAÑAMERO K.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

PH.D. ENRIQUE RICARDO FLORES MARIAZZA
RECTOR

DR. JORGE ALFONSO ALARCÓN NOVOA
VICERRECTOR ACADÉMICO

DRA. CARMEN ELOISA VELEZMORO SÁNCHEZ
VICERRECTORA DE INVESTIGACIÓN

DR. JOSÉ CARLOS VILCAPOMA
JEFE DE FONDO EDITORIAL

Absalón Vásquez V., Issaak Vásquez R., Cristian Vásquez R., Miguel Cañamero K.

FUNDAMENTOS DE INGENIERÍA DE RIEGOS

Lima: 2017; 442 p.

© Absalón Vásquez V., Issaak Vásquez R., Cristian Vásquez R., Miguel Cañamero K.

© Universidad Nacional Agraria La Molina

Av. La Molina s/n La Molina

Derechos reservados

ISBN: N° 978-612-4147-71-5

Hecho el Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° 2017-02119

Primera Edición: Febrero 2017 – Tiraje: 500 ejemplares

Impreso en Perú – Printed in Perú

Diseño y diagramación de carátula:

Roxana Perales Flores

Diseño, diagramación e impresión:

Q&P Impresores S.R.L.

Av. Ignacio Merino 1546 Lince - Lima

qypimpresores2005@yahoo.com

Febrero 2017

Queda prohibida por la Ley del Perú la reproducción total o parcial de esta obra por cualquier medio, ya sea electrónico, mecánico, químico, óptico, incluyendo sistema de fotocopiado, sin autorización escrita de la Universidad Nacional Agraria La Molina y del Autor. Todos los conceptos expresados en la presente obra son responsabilidad del autor.

DEDICATORIA

A mi madre la Sra. Rosa Villanueva Alfaro por su profunda preocupación y apoyo a mi formación profesional y a mi fiel compañera Isabel Romero Alegre por su permanente comprensión y apoyo.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	9
CAPÍTULO I	
EL SUELO	13
1.1 Propiedades físicas del suelo relacionadas con el riego	14
1.1.1 Textura del suelo	14
1.1.2 Estructura del suelo	16
1.1.3 Densidad real (D_r) o densidad de las partículas sólidas (D_p)	17
1.1.4 Densidad aparente o densidad seca (D_{ap})	17
1.1.5 Porosidad total del suelo (P_t)	18
1.1.6 Capacidad de retención de agua (Porcentaje de saturación, C_r)	21
1.1.7 Superficie específica	22
1.1.8 Conductividad hidráulica	22
CAPÍTULO II	
EL AGUA EN EL SUELO	29
2.1 Almacenamiento del agua en el suelo	30
2.1.1 Expresiones del contenido de humedad	30
2.1.2 Disponibilidad del agua en el suelo	51
2.1.3 Métodos para determinar el contenido de humedad del suelo	74
2.1.4 Variación del contenido de humedad	82

2.2	El agua en el suelo y el mecanismo de retención	88
2.2.1	Concepto energético en la retención del agua en el suelo	96
2.2.2	La curva de retención	100
2.2.3	Potencial total del agua en el suelo (Ψ_t)	104
2.2.4	Fenómeno de histéresis y la capacidad de retención de un suelo	107
2.3	Movimiento del agua en el suelo	112
2.3.1	Movimiento del agua en suelos no saturados	114
2.3.2	Movimiento del agua en suelos saturados	116
2.3.3	Movimiento del agua en el sistema planta – atmósfera	119
2.4	La absorción y el transporte del agua	123

CAPÍTULO III

MOVIMIENTO DEL AGUA EN EL RIEGO 125

3.1	El avance del agua en el riego por gravedad	127
3.2	Movimiento del agua en el riego a presión	134
3.3	Infiltración	135

CAPÍTULO IV

NECESIDADES DE AGUA EN LOS CULTIVOS 173

4.1	Conceptos básicos	174
4.1.1	Evaporación	174
4.1.2	Transpiración	174
4.1.3	Evapotranspiración	177
4.1.4	Evapotranspiración potencial (ETP)	177
4.1.5	Evapotranspiración máxima (ETm)	177
4.1.6	Evapotranspiración real o actual (ETA)	178
4.1.7	Factor de cultivo (K)	178
4.2	Evapotranspiración potencial (ETP)	178
4.3	Evapotranspiración real o actual (ETA)	208
4.4	Factor de cultivo (Kc)	210
4.5	Precipitación efectiva (Pe)	216
4.6	Necesidades de agua de los cultivos	225
4.7	Demanda de agua del proyecto	226

CAPÍTULO V

EFICIENCIA DE RIEGO	235
5.1 Eficiencia de riego (E_r)	235
5.2 Eficiencia de almacenamiento (E_s)	237
5.3 Eficiencia de conducción y distribución (E_{cd})	238
5.4 Eficiencia de aplicación (E_a)	238
5.5 Eficiencia de almacenamiento de agua en el suelo (E_{al})	239
5.6 Eficiencia de uso del agua por el cultivo (E_w)	239
5.7 Eficiencia de uso del agua del suelo (E_u)	240
5.7.1 Eficiencia de distribución longitudinal (E_{dl})	243
5.7.2 Eficiencia de conducción en canales principales (E_{cc})	244
5.7.3 Eficiencia de conducción en acequias o canales en parcelas (E_{pa})	244

CAPÍTULO VI

CALIDAD DEL AGUA DE RIEGO	255
6.1 Fisicoquímica de las aguas	257
6.1.1 Conceptos básicos	257
6.1.2 Conductividad eléctrica (CE)	259
6.2 Clasificación del agua de riego, según el U.S. Salinity Laboratory	262
6.2.1 Concentración total de sales	262
6.2.2 Concentración relativa del sodio	263
6.2.3 Concentración de boro	264
6.2.4 Clasificación del agua de riego	265
6.3 Evaluación de la calidad del agua de riego según la FAO	268
6.3.1 Salinidad	269
6.3.2 Infiltración del agua	269
6.3.3 Toxicidad de iones específicos	269
6.3.4 Contaminantes biológicos	270
6.3.5 Problemas varios	271

CAPÍTULO VII

DISEÑO DE UN SISTEMA E RIEGO POR GRAVEDAD	293
7.1 Descripción del riego por gravedad	294
7.2 Diseño del riego por melgas	294
7.3 Diseño del riego por surcos	305
7.4 Evaluación de un sistema de riego por gravedad	311

CAPÍTULO VIII

PROGRAMACIÓN DE RIEGOS	317
8.1 Déficit permisible de humedad en el suelo	318
8.2 Momento óptimo del riego	319
8.3 Programación de riegos	321

CAPÍTULO IX

VALOR ECONÓMICO DEL AGUA	329
9.1 Conceptos básicos	329
9.2 Aspectos generales de una función de producción	337
9.3 Tipos de funciones de producción	339
9.4 Etapas de una función de producción	342
9.5 Combinación óptima de insumos	344
9.6 Análisis de una función de producción	347
9.7 Determinación del valor económico del agua	353

CAPÍTULO X

LA FERTILIZACIÓN Y LA PRODUCTIVIDAD DE LOS CULTIVOS	361
10.1 Composición básica promedio de una planta	362
10.2 Elementos nutritivos esenciales para las plantas	363
10.3 Problemas de fertilización	373

CAPÍTULO XI

AGUA VIRTUAL Y HUELLA HÍDRICA	399
11.1 Definición de agua virtual	399
11.2 Comercio de agua virtual	400
11.3 Huella hídrica (HH)	400
11.4 Uso de los conceptos de agua virtual y huella hídrica	405

CAPÍTULO XII

MEDICIÓN DEL CAUDAL DE AGUA	411
12.1 Caudal	411
12.2 Métodos para la medición de caudales	411

REFERENCIAS	435
--------------------	-----

INTRODUCCIÓN

La práctica del riego de los cultivos data desde hace más de 5,000 años. Las primeras civilizaciones pudieron observar que para el crecimiento de las plantas los elementos básicos eran el suelo, el agua, los nutrientes y el sol (energía). Desde entonces, el uso del riego se fue introduciendo, extendiendo y perfeccionando en todo el mundo, hasta llegar a la actualidad.

Los objetivos que se buscan lograr con el riego son:

- Aplicar agua a la zona de raíces para el crecimiento de la planta.
- Lavado de sales en la zona de raíces del suelo, a fin de mantener un equilibrio de sales favorable al cultivo.
- Retardar la formación de brotes mediante el enfriamiento debido a la evaporación.
- Crear un microclima favorable para el crecimiento de la planta, mediante el enfriamiento del suelo y del aire alrededor de la planta.
- Disminuir o eliminar los efectos perjudiciales de las heladas.
- Controlar algunas plagas, en el caso de riego por gravedad.
- Inducir reacciones fisiológicas que favorezcan la producción: floración, maduración, concentración de azúcares, entre otros.

En la actualidad, solamente alrededor del 17% del área total bajo cultivo en el mundo está bajo riego. Por otro lado, el 40% de la producción total de alimentos en el mundo se obtiene de las áreas bajo riego, y se estima que el 10% de las áreas bajo riego están afectadas con problemas de drenaje y salinidad. Además, anualmente se van salinizando unas 2 millones de hectáreas de tierra bajo cultivo que en la mayor parte de casos se debe a la

aplicación excesiva de agua en el riego, es decir a las bajas eficiencias de riego especialmente a nivel parcelario.

Por otro lado, los demógrafos han estimado que la población mundial en el año 2050 estará bordeando los 9.6 mil millones de personas. De ese incremento, respecto a la población actual, correspondería alrededor del 98% a los países en desarrollo, mientras que en los países ricos o desarrollados el crecimiento será mínimo, es decir menor al 2% de su población actual. Esta situación se torna aún más crítica si se tiene en cuenta que en la actualidad, según la ONU, más de mil millones de personas en el mundo viven en una pobreza absoluta, con menos de US \$ 1 / día – persona; y contradictoriamente es en este segmento de la población donde se tienen las tasas más altas de crecimiento demográfico o de natalidad, acentuando y agrandando el nivel de pobreza. Resulta, entonces, un reto revertir esta situación. Para ello, se requiere trabajar en el incremento de la producción de alimentos mediante 4 acciones concretas:

- Incremento de la productividad, mediante el uso de tecnología.
- Mayor intensidad en el uso de la tierra y conservación de los suelos.
- Incremento del área cultivada.
- Incremento de la eficiencia de utilización del agua de riego, que actualmente es menor del 35% en promedio global.

Para alcanzar estos objetivos, se requiere concentrar los esfuerzos en lograr una **GESTIÓN EFICIENTE DEL AGUA DE RIEGO**. Ello será factible mediante el trabajo en 3 temas claves:

Modernización y fortalecimiento institucional, que comprende:

- Promover la adopción de nuevas tecnologías que permitan ahorro e incremento de la disponibilidad de agua.
- Promover la modernización de la infraestructura y su gestión eficiente.
- Lograr una administración y gestión eficiente y eficaz.
- Promover la participación activa de los usuarios de agua de riego en las actividades de operación, mantenimiento, mejoramiento de la

infraestructura de riego, drenaje y servicios; también en la planificación y distribución del agua a los diferentes usuarios.

- Fortalecer las organizaciones públicas y privadas relacionadas con el manejo y aprovechamiento de los recursos hídricos.

Participación de los usuarios, específicamente en:

- Desarrollar plenamente y en forma eficiente todas las tareas de la operación, mantenimiento y mejoramiento de la infraestructura y sistemas de riego, drenaje y demás servicios.
- La distribución y control del agua a los usuarios.
- Las decisiones de planificación e inversión en lo referente a infraestructura, producción, investigación, comercialización, capacitación, etc.
- Pago de la tarifa por el uso del agua, que represente su valor económico, para que sirva de base para las tareas de operación, mantenimiento y mejoramiento de la infraestructura y de la protección.
- Monitoreo y control de la calidad del agua.
- Desarrollar acciones de reforestación y cosecha de agua de lluvia en zonas áridas y semiáridas.

Inversión del Estado

Para mejorar la gestión del agua, se requiere que el Estado participe supervisando y controlando el cabal cumplimiento de las normas relacionadas a la gestión de los recursos hídricos. Al mismo tiempo, debe brindar incentivos para hacer más atractiva la inversión que puedan efectuar los usuarios ya sea a nivel individual o grupal, sobre todo para mejorar el manejo y la eficiencia de uso del agua y su productividad. Entre tales acciones se puede mencionar: el fortalecimiento institucional de las organizaciones de los usuarios, a fin de lograr una organización de carácter empresarial, capacitación técnica, adopción de nuevas tecnologías, cambio de sistemas de riego de gravedad a goteo o aspersión, equipamiento con maquinaria pesada para las tareas de prevención de máximas avenidas, entre otros.

CAPÍTULO I

EL SUELO

El suelo es un sistema heterogéneo, conformado por elementos sólidos (minerales y orgánicos), líquidos y gaseosos. Se caracteriza por propiedades específicas adquiridas durante su evolución y por el manejo recibido. Todo ello le confiere la capacidad de poder satisfacer, en mayor o menor grado, las necesidades vitales de las plantas durante su crecimiento y desarrollo. En la figura siguiente; se puede apreciar, esquemáticamente, la distribución relativa de las fases sólida, líquida y gaseosa en un perfil del suelo.

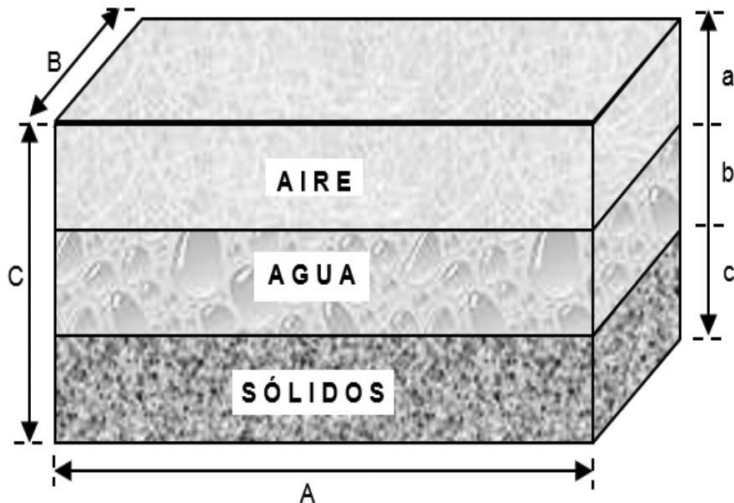


Figura N° 1.- Composición heterogénea del suelo

1.1 Propiedades físicas del suelo relacionadas con el riego

Del conjunto de propiedades físicas que caracterizan a los suelos, a continuación se describen sólo aquellas propiedades básicas aplicadas al riego.

1.1.1 Textura del suelo

Está determinada por la conformación granulométrica o composición mecánica del suelo, e indica la proporción que existe entre las diferentes fracciones de tamaño de partículas sólidas o fracciones granulométricas: arena, limo y arcilla, que corresponden a los siguientes rangos de tamaño de partículas de acuerdo a la escala internacional (Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo).

Fracción granulométrica	Rango de tamaño de partículas (mm)
Arena gruesa	2 – 0.2
Arena fina	0.2 – 0.02
Limo	0.02 – 0.002
Arcilla	<0.002

Para determinar la clase textural del suelo, es necesario realizar un análisis de laboratorio cuyos resultados se interpretan a través del “Triángulo de Textura” o “Triángulo Textural”.

Se puede distinguir doce clases texturales. Éstas se pueden agrupar en tres denominaciones de carácter más general:

- Suelos de textura gruesa o ligera.
- Suelos de textura media.
- Suelos de textura fina, pesada o arcillosa.

Estas agrupaciones comprenden las siguientes clases texturales, las que también pueden ser apreciadas en la figura N° 2:

Suelos de textura gruesa	{ Arenas Arenosos francos
Suelos de textura media	{ Franco arenosa Franco arcillo arenosa Franco limosa Limosa Franco arcillo limosa
Suelos de textura fina	{ Arcilla Arcillo limoso Arcillo arenoso Franco arcilloso Franco arcillo limoso

A la clasificación textural de los suelos le siguen las palabras de gravillas, gravas, piedras o rocas, si las hay. Así, se puede decir: suelo franco arenoso gravoso, suelo franco arcilloso arenoso pedregoso, suelo rocoso (si predominan los afloramientos rocosos), entre otras denominaciones. Se consideran gravas a los fragmentos de roca de 2 mm hasta 25 cm de diámetro (eje más largo) y piedras, a los fragmentos de roca de más de 25 cm de diámetro (eje más largo). Más del 20% entre gravas, piedras y rocas interfieren con la labranza del suelo.

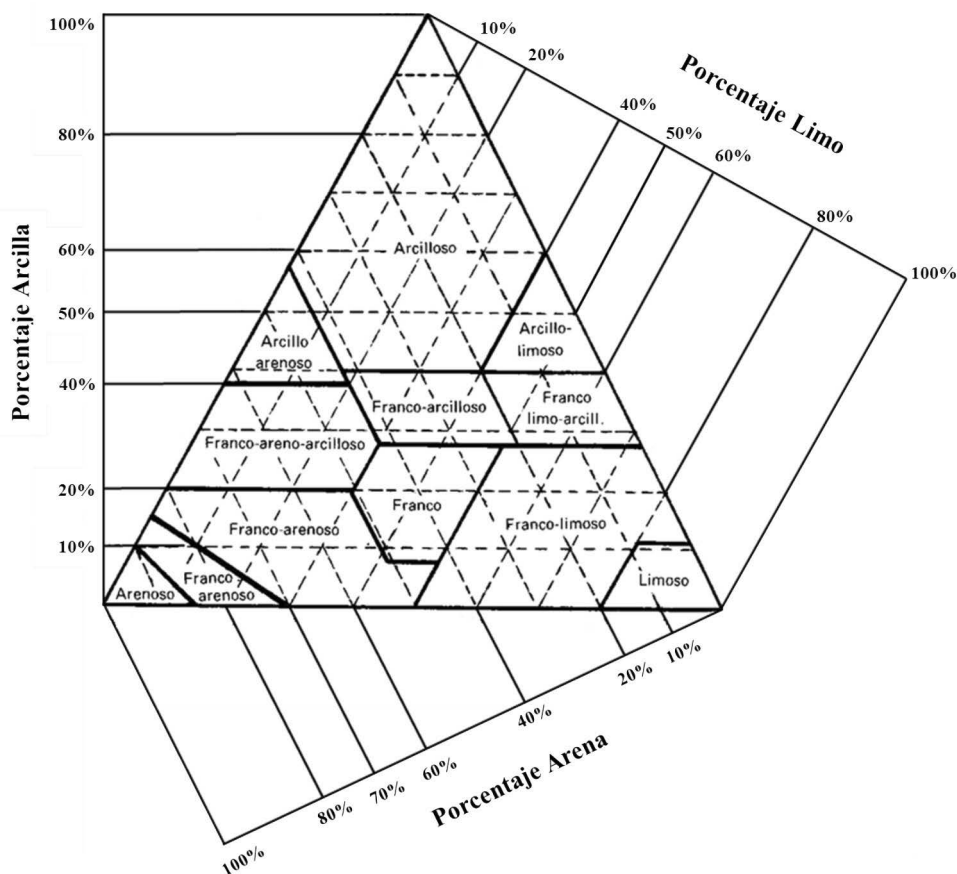


Figura N° 2.- Triángulo textural

1.1.2 Estructura del suelo

La estructura del suelo constituye el modo particular de agrupación o acomodo de las diferentes partículas sólidas del suelo, formando agregados. Esto influye tanto en las relaciones suelo-agua-planta como en el régimen de aeración del suelo y en el almacenamiento de sustancias nutritivas.

La forma de los agregados determina los tipos de estructura del suelo. Éstos pueden ser: laminar, prismático, columnar, poliédrico, granuloso y glomerular. La mejor estructura de un suelo es la glomerular. Se debe a la óptima hidroestabilidad que existe entre los espacios capilares que se presentan en los agregados.

1.1.3 Densidad real (D_r) o densidad de las partículas sólidas (D_p)

Representa la relación que existe entre el peso de sólidos (P_s) también llamada masa de sólidos (M_s) de la muestra de suelo y el volumen de las partículas sólidas (V_s) en estado compacto, sin considerar el volumen de los poros. Sus valores se expresan también en kg/dm^3 , t/m^3 ó g/cm^3 . Su determinación se efectúa mediante la relación:

$$D_p = D_r = \frac{P_s}{V_s} = \frac{M_s}{V_s} \quad \dots\dots\dots (1)$$

Los valores de la densidad de las partículas sólidas o densidad real (D_p) varían muy poco entre los diferentes tipos de suelo, y se encuentran dentro del rango de 2.5 a 2.7 g/cm^3 . La densidad de las partículas sólidas o densidad real se utiliza para calcular la porosidad del suelo.

1.1.4 Densidad aparente o densidad seca (D_{ap})

Representa la relación que existe entre el peso de suelo seco o peso de sólidos (P_s) o también masa de sólidos (M_s) y su volumen total (V_t) de una muestra de suelo no disturbada, cuyos valores se expresan generalmente en g/cm^3 , t/m^3 o kg/dm^3 . El cálculo se efectúa mediante la relación:

$$D_{ap} = \frac{P_s}{V_t} = \frac{M_s}{V_t} \quad \dots\dots\dots (2)$$

De la Figura N°1, se obtiene la siguiente relación:

$$D_{ap} = \frac{A*B*C*D_p}{A*B*C} = \frac{c*D_p}{c} \quad \dots\dots\dots (3)$$

Siendo D_p , la densidad de las partículas sólidas o densidad real. Los valores representativos de D_{ap} para las diferentes clases texturales se presentan a continuación:

Textura	Densidad aparente (D_{ap}) (g/cm ³)
Suelo arenoso	1.51 – 1.70
Suelo franco	1.31 – 1.50
Suelo arcilloso	1.00 – 1.30
Suelo volcánico	< 1.00

Normalmente, la determinación de la densidad aparente se puede efectuar mediante el método del anillo volumétrico o el método de la parafina. El más utilizado es el primero, y consiste en extraer una muestra de suelo no alterada, mediante un cilindro de volumen conocido y a la profundidad deseada. El volumen de un cilindro de tamaño adecuado para este tipo de trabajo, normalmente, varía entre 100 y 400 cm³.

1.1.5 Porosidad total del suelo (P_t)

Para conceptualizar el término de porosidad total del suelo; es necesario, en primer lugar, relacionarlo con las relaciones que existen entre los elementos del sistema heterogéneo del suelo, representados en la figura N° 3.

Volumen total del suelo (V_t):

$$V_t = V_s + V_a + V_g \quad \dots\dots\dots (4)$$

Siendo V_a y V_g Volumen de agua y volumen de aire respectivamente.

Volumen de poros (V_v):

$$V_v = V_a + V_g \quad \dots\dots\dots (5)$$

Relación de poros (e):

Es la relación que existe entre el volumen de los poros (V_v) y el volumen que ocupan los sólidos del suelo (V_s), representados en la figura N° 3.

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad \dots\dots\dots (6)$$



Figura N° 3.- Relaciones de volumen y masa de los componentes del suelo

Según el diámetro de los poros, la porosidad del suelo puede ser Capilar y No Capilar:

Capilar

Cuando los poros tienen un diámetro menor de 0.2 mm, éstos se encuentran en el interior de los agregados estructurales; y son los que determinan, por lo general, la capacidad del suelo para retener agua.

No Capilar

Cuando los poros mayores de 0.2 mm de diámetro se encuentren ubicados entre los agregados estructurales. Esta porosidad tiene la propiedad de mantener la aireación del suelo.

Por consiguiente, la porosidad capilar y no capilar constituye la porosidad total del suelo (P_t), que se define como la relación existente entre el

volumen de poros del suelo (V_v) que ocupa el agua y aire del suelo y el volumen total del suelo (V_t).

Luego, la porosidad total (P_t) o simplemente la porosidad del suelo se calcula mediante las relaciones:

$$P_t = \frac{\text{Volumen de poros del suelo}}{\text{Volumen total del suelo}} = \frac{V_v}{V_t} \dots\dots\dots (7)$$

De la figura N°1, se obtiene la siguiente relación:

$$P_t = \frac{A*B(a+b)}{A*B*C} = \frac{a+b}{C} \dots\dots\dots (8)$$

De las ecuaciones N° 6 y N° 7, se obtiene la siguiente relación:

$$P_t = \frac{V_v}{V_t} = \frac{V_v}{V_v + V_s} = \frac{V_v}{\frac{V_s}{V_s}(V_v + V_s)} = \frac{V_v}{V_s(\frac{V_v}{V_s} + \frac{V_s}{V_s})} = \frac{V_v}{V_s(e + 1)} = \frac{e}{1 + e} \dots(9)$$

La porosidad total del suelo (P_t) también se calcula según la relación:

$$P_t = \left(1 - \frac{\text{Densidad aparente}}{\text{Densidad de las partículas sólidas}}\right) = \left(1 - \frac{D_{ap}}{D_r}\right) \dots(10)$$

que expresada en porcentaje (%) será:

$$P_t(\%) = 100 * \left(1 - \frac{D_{ap}}{D_p}\right) \dots\dots\dots (11)$$

Se considera que una $P_t = 70\%$ es excesiva; es buena cuando varía entre 55 y 60%; satisfactoria cuando varía entre 50 y 55%; y no satisfactoria, cuando es menor del 50%. En forma general, el valor de P_t puede variar entre 0.3 a 0.7 ó 30% a 70%.

1.1.6 Capacidad de retención de agua (Porcentaje de saturación, C_r)

La capacidad de retención de agua o la saturación del suelo es una propiedad muy importante del suelo, y es un fenómeno complejo en el que intervienen varias fuerzas al interaccionar las fases sólida y líquida del suelo. Ocurre cuando el espacio de poros de un suelo está completamente lleno de agua, es decir no tiene nada de aire. De la figura N°3, la capacidad de retención de agua se determina mediante la relación:

$$C_r = \frac{\text{masa de agua a saturación}}{\text{masa de suelo seco}} = \frac{M_a + M_g}{M_s} \dots\dots\dots (12)$$

$$C_r(\%) = \frac{\text{masa de agua a saturación}}{\text{masa de suelo seco}} * 100 = \frac{M_a + M_g}{M_s} * 100 \dots\dots\dots (13)$$

También puede expresarse como una función del contenido de humedad sobre la base del volumen y a la porosidad del suelo:

$$C_r = \frac{V_{\text{agua}}}{V_{\text{aire}} + V_{\text{agua}}} = \frac{\theta_v}{P_t} \dots\dots\dots (14)$$

Donde C_r , P_t y θ_v se expresan en términos de contenido de humedad sobre la base del volumen. También puede expresarse de la siguiente manera:

$$\theta_v = \frac{V_{\text{agua}}}{V_{\text{total}}} = C_r P_t$$

$$\therefore C_r = \frac{A * B * (a+b) * \rho_w}{A * B * c * D_p} = \frac{(a+b) * \rho_w}{c * D_p} \dots\dots\dots (15)$$

$$C_r(\%) = \frac{(a+b) \cdot \rho_w}{c \cdot D_p} * 100 \quad \dots\dots\dots (16)$$

Donde: ρ_w = Densidad del agua, equivalente a 1 g/cm³.

1.1.7 Superficie específica

La superficie específica se refiere al área de la superficie de una partícula sólida. Cuanto más pequeña es la partícula, mayor es la superficie específica. La superficie específica está relacionada con otras propiedades importantes del suelo. Las partículas de arcilla con alta superficie específica tienen carga negativa que les permite reaccionar con iones cargados positivamente como el H⁺, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, k⁺, entre otros; y con moléculas dipolares como el agua.

1.1.8 Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica o permeabilidad del suelo al agua se refiere al grado de facilidad con que se mueve el agua dentro del suelo, y se mide en unidades de velocidad, tal como cm/h. La conductividad hidráulica se representa generalmente por la letra K, y es una propiedad muy importante a tenerse muy en cuenta en trabajos de riego y drenaje.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

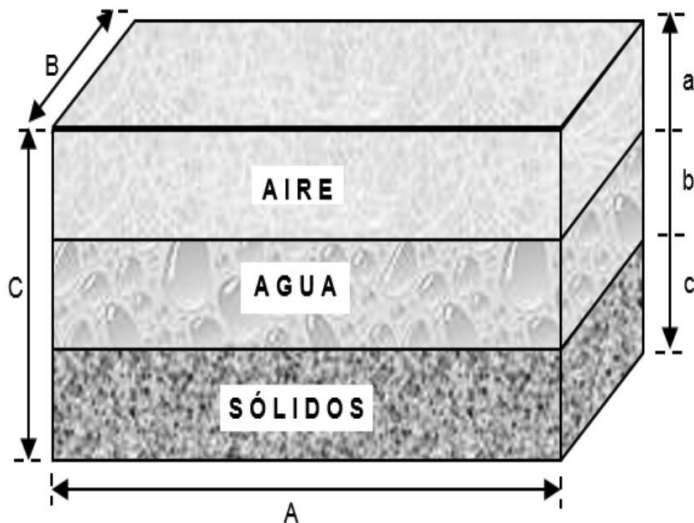
Problema N°1

Dada una muestra cúbica de suelo de 10 cm de lado y una masa total de 1.82 kg, de la cual 0.38 kg es agua; se pide determinar:

- a) Densidad aparente del suelo (D_{ap})
- b) Espesor de la capa de sólidos (c)
- c) Espesor de la capa de agua (b)
- d) Espesor de la capa de aire (a)
- e) Porosidad del suelo (P_t)
- f) Capacidad de retención (C_r)

La densidad de las partículas sólidas o densidad real del suelo (densidad de sólidos) es de 2.65 g/cm^3 , y la densidad del agua es de 1 g/cm^3 .

Solución:



a) Densidad seca o aparente del suelo (D_{ap}):

Datos:

- $A = B = C = 10 \text{ cm}$
- Masa total (M_t) = 1.82 kg
- Masa de agua (M_a) = 0.38 kg

La densidad seca o aparente del suelo (D_{ap}) está dada por la siguiente ecuación:

$$D_{ap} = \frac{M_s}{V_t} = \frac{P_s}{V_t}$$

Donde:

$M_s = P_s$ = Masa de suelo seco

V_t = Volumen total del suelo

Masa de suelo seco (M_s) = $M_t - M_a = 1.82 \text{ kg} - 0.38 \text{ kg} = 1.44 \text{ kg} = 1,440 \text{ g}$

Volumen total del suelo = $A * B * C = 10 \text{ cm} * 10 \text{ cm} * 10 \text{ cm} = 1,000 \text{ cm}^3$

➤ Reemplazando valores en la ecuación de densidad seca o aparente, se tiene que:

$$D_{ap} = \frac{1,440 \text{ gr}}{1,000 \text{ cm}^3} = 1.44 \text{ g/cm}^3$$

Entonces, la densidad seca o aparente del suelo será:

Rpta: $D_{ap} = 1.44 \text{ g/cm}^3$

b) Espesor de la capa de los sólidos (c):

De la figura anterior:

- Los lados del cubo son: $A = B = C = 10 \text{ cm}$
- Masa total del suelo (M_t) = 1.82 kg
- Masa de agua (M_a) = 0.38 kg
- Densidad real o densidad de las partículas (D_r) = 2.65 g/cm³

- Espesor de sólidos: c
- Espesor de la capa de agua: b
- Espesor de la capa de aire: a

La densidad real (D_r) o densidad de las partículas (D_p) está dada por la siguiente ecuación:

$$D_p = D_r = \frac{P_s}{V_s} = \frac{M_s}{V_s}$$

Donde:

$M_s = P_s$ = Masa de suelo seco

V_s = Volumen total de las partículas sólidas

Masa de suelo seco (M_s) = $M_t - M_a$

$M_s = 1.82 \text{ kg} - 0.38 \text{ kg}$

$M_s = 1.44 \text{ kg}$

$M_s = 1,440 \text{ g}$

Volumen total de las partículas sólidas (V_s) = $A * B * c = 10 \text{ cm} * 10 \text{ cm} * c = 100 \text{ cm}^2 * c$

$V_s = 10 \text{ cm} * 10 \text{ cm} * c$

$V_s = 100 \text{ cm}^2 * c$

➤ Reemplazando en la relación de densidad real o densidad de las partículas (D_p):

$$D_p = 2.65 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} = \frac{M_s}{V_s}$$

$$2.65 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} = \frac{M_s}{V_s}$$

Despejando "c", se obtiene el espesor de sólidos, que en este caso es de: 5.43 cm.

Por lo tanto: **Rpta:** $c = 5.43 \text{ cm}$

c) Espesor de la capa de agua (b):

Datos:

- Lados del cubo: $A = B = C = 10 \text{ cm}$
- Masa de agua (M_a) = 0.38 kg = 380 g
- Densidad del agua (ρ_w) = 1 g/cm³

La densidad del agua (ρ_w) está dada por la siguiente ecuación:

$$\rho_w = \frac{M_a}{V_a}$$

Donde:

M_a = Masa de agua

V_a = Volumen del agua

Masa de agua = 0.38 kg = 380 g

Volumen de agua = $A * B * b = 10 \text{ cm} * 10 \text{ cm} * b = 100 \text{ cm}^2 * b$

➤ Reemplazando en la ecuación de la densidad del agua, se tiene que:

$$1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = \frac{380 \text{ g}}{100 \text{ cm}^2 * b}$$

$$B_w = 1 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} = \frac{M_a}{V_a}$$

$$1 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} = \frac{M_a}{V_a}$$

Despejando "b", se obtiene que el espesor del agua es 3.80 cm

Rpta: $b = 3.80 \text{ cm}$

d) Espesor de la capa de aire (a)

Datos:

- $C = 10 \text{ cm}$
- Espesor de sólidos (c) = 5.43 cm
- Espesor del agua (b) = 3.80 cm
- Si $C = a + b + c$

➤ Reemplazando valores

$$10 \text{ cm} = a + 3.80 \text{ cm} + 5.43 \text{ cm}$$

Despejando "a", se obtiene que el espesor del aire es 0.77 cm

$$\text{Rpta: } \boxed{a = 0.77 \text{ cm}}$$

e) Porosidad del suelo (P_t):

Datos:

- La Densidad seca ó aparente (D_{ap}) es de 1.44 g/cm³
- La Densidad real o de las partículas del suelo (D_p) es de 2.65 g/cm³
- Lados del cubo $A = B = C = 10 \text{ cm}$
- Espesor de sólidos (c) = 5.43 cm
- Espesor del agua (b) = 3.80 cm
- Espesor del aire (a) = 0.77 cm

La porosidad del suelo se calculará mediante las siguientes relaciones:

$$\boxed{P_t = \frac{a + b}{C}}$$

$$\boxed{P_t = \left(1 - \frac{D_{ap}}{D_p}\right)}$$

➤ Para el primer caso, se reemplazan los datos dados en la primera relación:

$$\boxed{P_t = \frac{0.77 + 3.80}{10} = 0.46}$$

➤ Para el segundo caso, se reemplazan los datos dados en la segunda relación:

$$\boxed{P_t = \left(1 - \frac{1.44}{2.65}\right) = 0.46}$$

En ambos casos, se obtiene una porosidad total de 0.46, que expresada en términos de porcentaje será: 46%

Rpta: $P_t = 0.46 = 46\%$

f) Capacidad de retención de agua (C_r) o saturación del suelo:

Datos:

- La densidad del agua (ρ_w) = 1 g/cm^3
- La Densidad seca o aparente (D_{ap}) = 1.44 g/cm^3
- Densidad de las partículas sólidas (D_p) o densidad real (D_r) = 2.65 g/cm^3
- Lado del cubo $A = B = C = 10 \text{ cm}$
- Espesor de sólidos (c) = 5.43 cm
- Espesor del agua (b) = 3.80 cm
- Espesor del aire (a) = 0.77 cm

La capacidad de retención se calcula mediante la ecuación:

$$C_r(\%) = \left[\frac{(a + b) * \rho_w}{c * D_r} \right] * 100$$

Reemplazando valores de la relación anterior, se obtiene:

$$C_r(\%) = \left[\frac{(0.77 \text{ cm} + 3.80 \text{ cm}) * 1 \text{ g/cm}^3}{5.43 \text{ cm} * 2.65 \text{ g/cm}^3} \right] * 100 = 31.8\%$$

Finalmente, la capacidad de retención (C_r) o saturación del suelo será:

Rpta: $C_r = 0.318 = 31.8\%$

CAPÍTULO II

EL AGUA EN EL SUELO

Mediante el riego, se busca restituir al suelo la cantidad de agua perdida por la evaporación y transpiración. Con ello, se brinda al cultivo condiciones apropiadas de humedad para su adecuado desarrollo. En la figura siguiente, se puede apreciar la distribución relativa de las fases sólida, líquida y gaseosa del suelo.

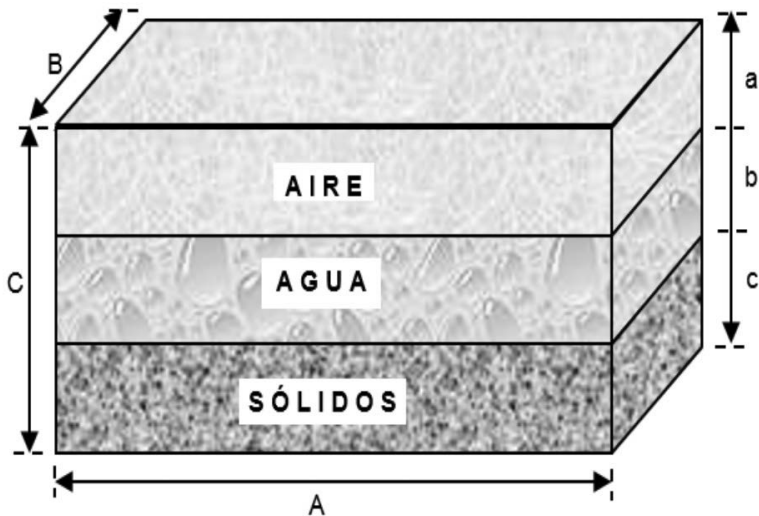


Figura N° 1.- Sistema heterogéneo del suelo

2.1 Almacenamiento del agua en el suelo

El almacenamiento del agua en el suelo y su distribución en la zona de raíces es de suma importancia para el crecimiento, manejo y producción de los cultivos.

2.1.1 Expresiones del contenido de humedad

El contenido de humedad o cantidad de agua que tiene o retiene una muestra de suelo se puede expresar en términos de masa o peso, volumen o lámina de agua. A continuación podemos ver las relaciones de volumen y masa de los componentes del suelo.



a) Contenido de humedad expresada en base a masa o peso de agua (θ_m)

$$\theta_m = \frac{\text{masa de agua}}{\text{masa de suelo seco}} = \frac{\text{peso de agua}}{\text{peso de suelo seco}} = \frac{M_a}{M_s} \quad \dots\dots\dots (1)$$

Por otro lado, la masa de suelo seco o masa de sólidos (M_s) es igual al producto de la densidad real o densidad de las partículas sólidas (D_p) por el volumen de sólidos. En el presente caso, se representa mediante la relación:

$$\text{masa de sólidos } (M_s) = D_p * (A * B * c)$$

Observando la Figura N° 1 se puede afirmar que:

$A * B * c$ = volumen de sólidos

El contenido de humedad expresado sobre la base de la masa por ciento está definido por:

$$\theta_m(\%) = \theta_m * 100 \quad \dots\dots\dots (2)$$

De la Figura N° 1 y de la ecuación (1), se obtiene lo siguiente:

$$\theta_m = \frac{\text{masa de agua}}{\text{masa de suelo seco}} = \frac{M_a}{M_s} = \frac{\rho_w * V_a}{D_p * V_s} = \frac{\rho_w * A * B * b}{D_p * A * B * c} = \frac{\rho_w * b}{D_p * c} \quad \dots\dots (3)$$

$$\theta_m = \frac{\rho_w * b}{D_p * c}$$

Reemplazando (3) en (2), se obtiene:

$$\theta_m(\%) = \frac{\rho_w * b}{D_p * c} * 100 \quad \dots\dots\dots (4)$$

b) Contenido de humedad expresado en base a volumen (θ_v)

$$\theta_v = \frac{\text{Volumen de agua}}{\text{Volumen total del suelo}} = \frac{V_a}{V_t} \quad \dots\dots\dots (5)$$

La expresión porcentual de θ_v está dada por:

$$\theta_v(\%) = \theta_v * 100 \quad \dots\dots\dots (6)$$

De la figura N° 1 y la ecuación (5), se tiene lo siguiente:

$$\theta_v = \frac{\text{Volumen de agua}}{\text{Volumen total del suelo}} = \frac{V_a}{V_t} = \frac{A * B * b}{A * B * C} = \frac{b}{C}$$

$$\theta_v = \frac{b}{C} = \frac{v_a}{v_t} \dots\dots\dots (7)$$

Reemplazando (7) en (6), se obtiene:

$$\theta_v(\%) = \frac{b}{C} * 100 \dots\dots\dots (8)$$

De las ecuaciones (4) y (8) se despeja la lámina de agua “b” y se obtiene:

$$b = \frac{\theta_m(\%) * c * D_p}{\rho_w * 100 \%} \quad y \quad b = \frac{\theta_v(\%) * C}{100 \%}$$

Al igualar ambas ecuaciones y considerando la densidad aparente como $D_{ap} = c * D_p / C$ y despejando el contenido de humedad sobre la base del porcentaje de volumen, resulta:

$$\theta_v(\%) = \frac{\theta_m(\%) * D_{ap}}{\rho_w} \dots\dots\dots (9)$$

Si es que reemplazamos (2) y (6) en (9) entonces la ecuación cambiaría a lo siguiente:

$$\theta_v = \frac{\theta_m * D_{ap}}{\rho_w} \dots\dots\dots (10)$$

Como normalmente resulta que la densidad del agua (ρ_w) es igual a 1.0, entonces las dos ecuaciones anteriores se pueden expresar como:

$$\theta_v(\%) = \theta_m(\%) * D_{ap} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$\theta_v = \theta_m * D_{ap} \quad \dots\dots\dots (11)$$

c) Contenido de humedad expresada como lámina de agua ($L_a = b$)

Si se reemplaza la ecuación (9) en la ecuación (8), se obtiene que:

$$b = L_a = \frac{\theta_m(\%) * D_{ap} * C}{\rho_w * 100\%} \quad \dots\dots\dots (12)$$

De la misma forma si reemplazamos la ecuación (10) en (7), se obtiene que:

$$b = L_a = \frac{\theta_m * D_{ap} * C}{\rho_w} \quad \dots\dots\dots (13)$$

Si la lámina de agua se desea calcular en función de θ_v (%) y de θ_v , entonces reemplazamos (9) en (12) y (10) en (13) respectivamente y se obtiene lo siguiente:

$$b = L_a = \frac{\theta_v(\%) * C}{100 \%} \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$b = L_a = \theta_v * C \quad \dots\dots\dots (15)$$

En la práctica se utiliza con más frecuencia la ecuación (12) y se considera que la densidad del agua $\rho_w = 1\text{gr/cm}^3$; por lo que normalmente se utiliza en la práctica la siguiente expresión:

$$b = La = \frac{\theta_m(\%) * D_{ap} * C}{100 \%} \dots\dots\dots (16)$$

Es importante resaltar que el obviar la densidad de la ecuación anterior por ser igual a la unidad crea una inconsistencia en las unidades; por lo que para resolver esta ecuación se recomienda sólo colocar valores numéricos de $\theta_m(\%)$; D_{ap} y C .

Donde:

- b** : Lámina de agua expresada en (cm).
C : Profundidad del suelo de la cual se quiere evaluar su contenido de humedad (cm).
 $\theta_m(\%)$: Contenido de humedad expresado en base a masa (%).
 D_{ap} : Densidad aparente o densidad seca del suelo (g/cm^3).
 D_p : Densidad de las partículas sólidas o densidad real (g/cm^3).

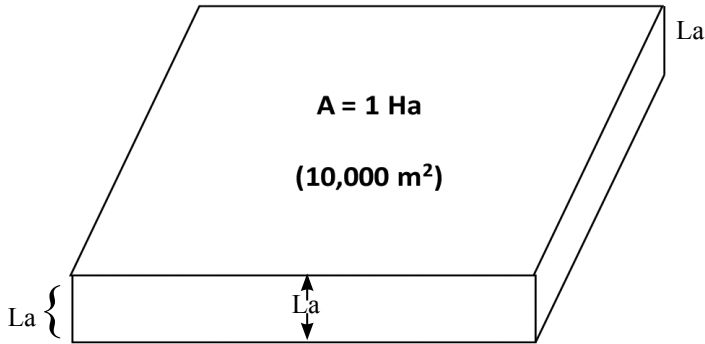
Como se mencionó anteriormente C representa la profundidad del suelo; por lo que podemos expresar la ecuación de la lámina de agua que se encuentra en esa profundidad del suelo de la siguiente forma:

$$La = \frac{\theta_v(\%) * \text{Prof}}{100 \%} \dots\dots\dots (17)$$

Una forma común de expresar la lámina de agua es en mm/m lo cual quiere decir cuántos milímetros de agua hay en cada metro de suelo, por lo que la ecuación se modificará de la siguiente forma:

$$La(\text{mm/m}) = \frac{La}{\text{prof}} \quad \begin{matrix} \leftarrow & mm \\ \leftarrow & m \end{matrix}$$

Para entender mejor esta relación se tiene:



Donde:

La : Lámina de agua (mm ó cm)

$$Volumen\ de\ agua = A_{terreno} * La$$

Ejemplo:

Una lámina de agua (La) = 10 mm, significa un volumen de agua por hectárea (m^3/ha):

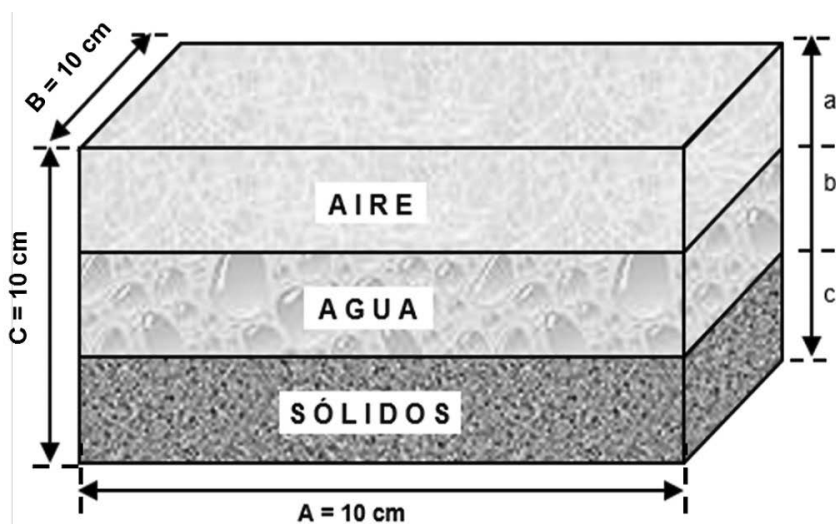
$$Vol = (10,000\ m^2/ha) * \left(\frac{10\ mm}{\frac{1,000\ mm}{1\ m}} \right)$$

Rpta: Un lámina de 10 mm de agua equivale a: $Vol = 100\ m^3/ha$

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

Problema N°1

Una muestra cúbica de suelo de 10 cm de lado tiene un peso total de 1,460 g, de los cuales 260 g es agua. Se pide determinar:



- Contenido de humedad en base a peso o masa de agua (θ)
- Porcentaje de humedad en base a peso o masa de agua (θ_m , %)
- Contenido de humedad en base a volumen (θ)
- Porcentaje de humedad en base a volumen (θ_v , %)
- Contenido de humedad expresada en términos de lámina de agua (**b**)

Si además se sabe que la densidad real del suelo (densidad de sólidos) es de 2.65 g/cm^3 , y la densidad del agua es de $\rho_w = 1 \text{ g/cm}^3$.

Solución:

a) Contenido de humedad expresado sobre la base de masa o peso de agua en una muestra de suelo (θ_m):

Datos:

- Lado del cubo = **10 cm**
- Masa total del suelo seco o sólidos (M_t) = **1,460 g**
- Masa de agua (M_a) = **260 g**

El contenido de humedad sobre la base de masa o peso seco de agua en una muestra de suelo (θ_m) está dado por la siguiente ecuación:

$$\theta_m = \frac{M_a}{M_s}$$

Si:

- Masa de agua (M_a) = **260 g**
- Masa de suelo seco (M_s) = $M_t - M_a$

$$M_s = 1,460 \text{ g} - 260 \text{ g}$$

$$M_s = 1,200 \text{ g}$$

➤ Reemplazando valores en la ecuación anterior, se obtiene que el contenido de humedad sobre la base de peso seco o masa será:

$$\theta_m = \frac{260 \text{ g}}{1,200 \text{ g}} = 0.217$$

Rpta:

$$\theta_m = 0.217$$

b) Porcentaje de humedad sobre la base de masa o peso de agua en una muestra de suelo, θ_m (%):

Datos:

- El contenido de humedad sobre la base de peso de agua (θ_m) es de 0.217 g agua/ g suelo seco.

- La humedad en porcentaje sobre la base de masa o peso de agua está dada por la siguiente ecuación:

$$\theta_m(\%) = \theta_m * 100$$

➤ Reemplazando valores en la ecuación anterior, se obtiene que:

$$\theta_m(\%) = 0.217 * 100 = 21.7\%$$

Rpta:

$$\theta_m(\%) = 21.7\%$$

c) Contenido de humedad expresado sobre la base de volumen, (θ_v):

Datos:

- Lados del cubo $A = B = C = 10 \text{ cm}$
- Masa de agua (M_a) = **260 g**

El contenido de humedad sobre la base de volumen (θ_v) está dado por la siguiente relación:

$$\theta_v = \frac{V_a}{V_t}$$

- El Volumen de agua (V_a) se calculará a partir de la relación:

$$\rho_w = \frac{M_a}{V_a}$$

Por dato del problema, la densidad del agua (ρ_w) es igual a 1 g/cm^3 ; además:

- M_a = Masa de agua, y
- V_a = Volumen del agua

Reemplazando valores en la ecuación anterior, se obtiene que:

$$\rho_w = \frac{260 \text{ g}}{V_a} \Rightarrow V_a = \frac{260 \text{ g}}{1 \text{ g/cm}^3}$$

$$V_a = 260 \text{ cm}^3$$

El volumen total de la muestra de suelo (V_t) será:

$$V_t = A * B * C = (10 \text{ cm})^3 = 1,000 \text{ cm}^3$$

$$V_t = 1,000 \text{ cm}^3$$

Reemplazando valores de V_a y V_t en la ecuación del contenido de humedad sobre la base de volumen (θ_v), se obtiene que:

$$\theta_v = \frac{V_a}{V_t}$$

$$\theta_v = \frac{260 \text{ cm}^3}{1,000 \text{ cm}^3} = 0.260$$

Rpta:

$\theta_v = 0.26$

d) Porcentaje de humedad sobre la base de volumen, θ_v (%):

Datos:

- Si el contenido de humedad sobre la base de volumen (θ_v) es **0.260**
- El porcentaje de humedad sobre la base de volumen θ_v está dado por la siguiente ecuación:

$\theta_v(\%) = \theta_v * 100$

Reemplazando valores se obtiene que:

$$\theta_v (\%) = 0.260 * 100 = 26.0\%$$

Rpta: $\theta_v (\%) = 26.0\%$

e) Contenido de humedad expresado en términos de lámina de agua, “b”:

Datos:

Lado del cubo = 10 cm

De los puntos b) y d) se tiene que:

- El contenido de humedad expresado sobre la base de peso o masa de agua, $\theta_m (\%) = 21.7\%$
- El porcentaje de humedad sobre la base de volumen de agua, $\theta_v (\%) = 26.0 \%$

Antes de calcular el contenido de humedad “La” procedemos a calcular D_{ap} ya que este es uno de los valores que necesitamos para el cálculo de lo que se nos está pidiendo:

$$\theta_v (\%) = \frac{\theta_m (\%) * D_{ap}}{\rho_w}$$

Despejando D_{ap} se tiene:

$$D_{ap} = \frac{\theta_v (\%) * \rho_w}{\theta_m (\%)}$$

Reemplazando valores, se obtiene:

$$D_{ap} = \frac{(26.0 \%) (1 \text{ gr/cm}^3)}{21.7 \%$$

$D_{ap} = 1.2 \text{ gr/cm}^3$
--

Ahora, si procedemos a calcular el contenido de humedad “La”; el mismo que puede ser calculado por las siguientes ecuaciones:

$$La = b = \frac{\theta_m(\%) * D_{ap} * C}{\rho_w * 100 \%} \dots\dots\dots (a)$$

$$La = b = \frac{\theta_m * D_{ap} * C}{\rho_w} \dots\dots\dots (b)$$

$$La = b = \frac{\theta_v(\%) * C}{100} \dots\dots\dots (c)$$

$$La = b = \theta_v * C \dots\dots\dots (d)$$

$$La = b = \frac{\theta_m(\%) * D_{ap} * C}{100} \dots\dots\dots (e)$$

Donde:

- C** : Profundidad del suelo (cm);
 $\theta_m(\%)$: Contenido de humedad en base a masa (%);
 θ_m : Contenido de humedad en base a masa;
 $\theta_v(\%)$: Contenido de humedad en base a volumen (%);
 θ_v : Contenido de humedad en base a volumen;
 D_{ap} : Densidad aparente (g/cm³) y
 ρ_w : Densidad del agua (g/cm³)

Aplicando ecuación (a):

$$La = b = \frac{\theta_m(\%) * D_{ap} * C}{\rho_w * 100 \%}$$

$$La = b = \frac{(21.7 \%) * (1.2 \text{ gr/cm}^3) * (10 \text{ cm})}{(1 \text{ gr/cm}^3) * (100 \%)}$$

La = 2.6 cm

Aplicando ecuación (b):

$$La = b = \frac{\theta_m * D_{ap} * C}{\rho_w}$$

$$La = b = \frac{(0.217) * (1.2 \text{ gr/cm}^3) * (10 \text{ cm})}{(1 \text{ gr/cm}^3)}$$

La = 2.6 cm

Aplicando ecuación (c):

$$La = b = \frac{\theta_v(\%) * C}{100 \%}$$

$$La = b = \frac{(26.0 \%) * (10 \text{ cm})}{100 \%}$$

La = 2.6 cm

Aplicando la ecuación (d):

$$La = b = \theta_v * C$$

$$La = b = (0.26) * (10 \text{ cm})$$

La = 2.6 cm

Aplicando la ecuación (e):

Esta es la ecuación más utilizada pero debido a que no se toma en cuenta la densidad del agua dentro de la ecuación ya que es igual a uno, toda la ecuación pierde consistencia en sus unidades; por lo tanto cuando se utiliza esta ecuación se recomienda no colocar las unidades.

$$La = b = \frac{\theta_m(\%) * D_{ap} * C}{100}$$

$$La = b = \frac{21.7 * 1.2 * 10}{100}$$

$$\boxed{La = 2.6 \text{ cm}}$$

(Al no colocarse las unidades de la densidad dentro de la ecuación genera inconsistencia en toda la ecuación)

Hemos podido ver que se llega a la misma respuesta utilizando cualquiera de las 5 ecuaciones. Por lo tanto podemos concluir que:

Rpta:

La lámina de agua que contiene los 10 cm de profundidad de suelo es 2.6 cm.

Problema N°2

Una muestra de suelo extraída del campo tiene un peso húmedo de 220 kg; el contenido de humedad de agua en la muestra de suelo es de: $\theta_m = 0.18$. Hallar la masa de sólidos o masa de suelo seco " M_s " y la masa de agua " M_a " de dicha muestra:

Solución:

Datos:

- Peso húmedo de la muestra (M_t) = **220 kg**
- Contenido de humedad de la muestra en base a peso de agua (θ_m) = **0.18**

Según la relación:

- Masa total = Masa de agua + Masa de sólidos

$$M_t = M_a + M_s \quad \dots\dots\dots(a)$$

$$\theta_m = \frac{\text{masa de agua}}{\text{masa de suelo seco}} = \frac{M_a}{M_s} \quad \dots\dots\dots (b)$$

El contenido de humedad expresado en masa o peso de agua en la muestra de suelo (θ_m) será:

➤ Reemplazando valores en (a) y en (b):

$$220 \text{ kg} = M_a + M_s \quad \dots\dots\dots (a)$$

$$0.18 = \frac{M_a}{M_s} \quad \dots\dots\dots (b)$$

Resolviendo las ecuaciones (a) y (b), se obtiene que:

Rpta:

La masa de suelo seco (M_s) es 186.4 kg y la masa de agua (M_a) es 33.6 kg

Problema N°3

Una muestra de suelo tiene un contenido de humedad en base a volumen de $\theta_v = 0.12$. Determinar la cantidad de agua que hay que agregar a dicho suelo para llevar el valor de θ_v a 0.30, en una profundidad de 80 cm.

Solución:



Datos:

- Contenido de humedad inicial en base a volumen de $\theta_v = 0.12$
- Contenido de humedad final en base a volumen de $\theta_v = 0.30$
- Profundidad del suelo, $C = 80 \text{ cm}$
- La lámina de agua (b) que se tiene que agregar es la diferencia de la lámina de agua final (b_f) y la lámina de agua inicial (b_i), es decir: $L = b_f - b_i$

Según la relación (Ver ecuación 7):

$$\theta_v = \frac{b}{c} \quad \text{Despejando se tiene: } b = C * \theta_v$$

- La lámina de agua “b”, según la relación anterior, será:
 Lámina inicial de agua será $b_i = C * \theta_v = (80 \text{ cm}) * (0.12) = 9.6 \text{ cm}$
 Lámina final de agua será $b_f = C * \theta_v = (80 \text{ cm}) * (0.30) = 24 \text{ cm}$
- Remplazando valores:
 $L = \text{Lámina final de agua} - \text{Lámina inicial de agua}$
 $L = b_f - b_i$
 $L = 24 \text{ cm} - 9.6 \text{ cm} = 14.4 \text{ cm}$

Luego, la lámina de agua que se tiene que agregar en el riego, es de 14.4 cm

Rpta: $L = La = 14.4 \text{ cm}$

Problema N°4

Los siguientes datos corresponden a 2 suelos adyacentes que tienen las mismas características: uno cultivado y el otro sin cultivar. Se han hecho calicatas en cada uno de ellos, y se han tomado muestras de suelo húmedo (M_h) o masa total (M_t) y suelo seco (M_s), cada 20 cm de profundidad. Las muestras de suelo son extraídas mediante un anillo cilíndrico de 5 cm de diámetro. En el cuadro siguiente, se presentan los resultados:

Profundidad (cm)	Suelo sin cultivo		Suelo Cultivado	
	M_h (g)	M_s (g)	M_h (g)	M_s (g)
0 - 20	247	235	239	230
20 - 40	306	245	265	241
40 - 60	316	247	272	245
60 - 80	324	249	278	248
80 - 100	325	250	280	250

Se pide determinar:

- La lámina de agua que existe en el suelo del área sin cultivar hasta los 100 cm de profundidad.
- Calcular y comparar el contenido de agua en las muestras tomadas en las áreas cultivadas y sin cultivar.

Para los cálculos, considerar a la densidad del agua (ρ_w) = 1 g/cm³.

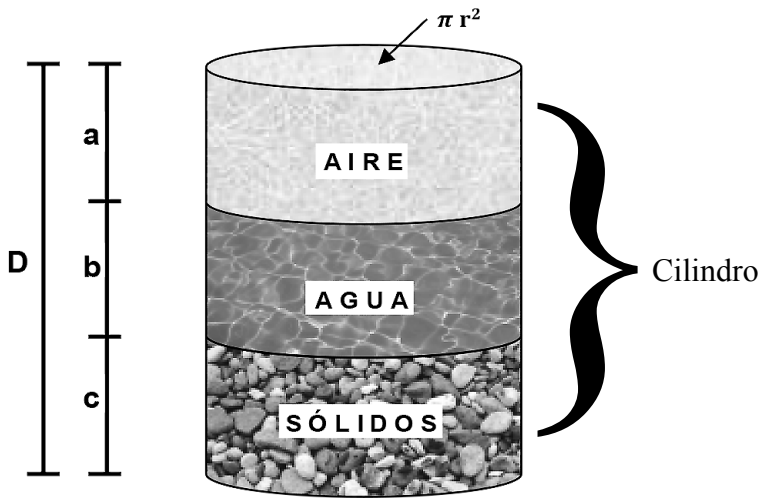
Solución:

- La lámina de agua que existe en el suelo del área sin cultivar hasta los 100 cm de profundidad será:**

Datos:

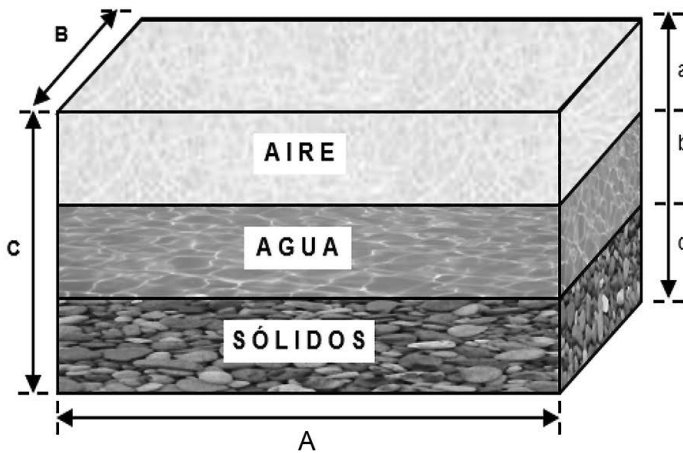
- Profundidad o espesor de la capa de suelo en análisis: $C = 20$ cm
- Muestra de suelo cilíndrica de radio: $(r) = 2.5$ cm y espesor $D = 10$ cm
- Total de la profundidad de suelo: $(P) = 100$ cm

La siguiente figura muestra el esquema del anillo cilíndrico:



Cilindro muestreado

La siguiente figura muestra el esquema homogéneo del suelo:

Esquema del suelo a analizar de profundidad $C = 20$ cm

Para determinar la lámina de agua del suelo sin cultivo, es necesario obtener las láminas parciales de cada estrato, para lo cual se requiere utilizar la siguiente relación:

$$\theta_v = \frac{\text{Volumen de agua en el cilindro}}{\text{Volumen total del cilindro}} = \frac{V_b}{V_t} = \frac{(\pi r^2) * b}{(\pi r^2) * D}$$

Despejando “b”, se obtiene:

$$\frac{V_b}{V_t} = \frac{(\pi r^2) * b}{(\pi r^2) * D}$$

$$\frac{b}{D} = \frac{V_b}{V_t}$$

La relación $\frac{V_b}{V_t}$ será la misma en el cilindro muestreado y en toda la profundidad de suelo (C) a la que representa esta muestra; por lo tanto se puede afirmar que la lámina de agua del suelo (b) en la profundidad del suelo (C) que se desea analizar es igual a:

$$\frac{b}{D} = \frac{b}{C} = \frac{V_b}{V_t}$$

Dónde:

- θ_v : Contenido de humedad en base a volumen,
- V_t : Volumen total de suelo de la capa que se evalúa,
- V_b : Volumen de agua en el cilindro muestreado
- V_t : Volumen total de suelo en el cilindro muestreado
- b : Lámina de agua en el cilindro muestreado
- D : Profundidad o espesor del cilindro muestreado
- b : Lámina de agua en la capa de suelo que se evalúa, y
- C : Profundidad o espesor de la capa de suelo de la cual se quiere evaluar el contenido de humedad.

Además, se sabe que:

$$\bullet \quad V_b \begin{cases} \nearrow V_b = \pi r^2 * b \\ \searrow V_b = \frac{M_a}{\rho_w} \end{cases}$$

$$\bullet \quad V_t = D \pi r^2$$

$$\bullet \quad M_a = M_t - M_s$$

Entonces:

$$b = C * \frac{V_b}{V_t} = \frac{C * \frac{M_a}{\rho_w}}{D * \pi * r^2} = \frac{C * M_a}{D * \rho_w * \pi * r^2}$$

$$= \frac{20 * (M_t - M_s)}{10 * \rho_w * \pi * r^2} = \frac{2 * (M_t - M_s)}{\rho_w * \pi * r^2}$$

$$b = \frac{2 * (M_t - M_s)}{\rho_w * \pi * r^2}$$

Por lo tanto, para cada capa o estrato la lámina de agua se calculará de la manera siguiente:

$$b_i = \frac{2 * (M_{ti} - M_{si})}{\rho_w * \pi * r^2}$$

Reemplazando datos para el cálculo de cada capa de suelo o estrato, se obtiene:

$$b_{0-20} = \frac{2 * (247 \text{ gr} - 235 \text{ gr})}{1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} * \pi * (2.5 \text{ cm})^2} = \frac{24}{19.63} \text{ cm} = 1.22 \text{ cm}$$

$$b_{20-40} = \frac{2 * (306 \text{ gr} - 245 \text{ gr})}{1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} * \pi * (2.5 \text{ cm})^2} = \frac{122}{19.63} \text{ cm} = 6.21 \text{ cm}$$

$$b_{40-60} = \frac{2 * (316 \text{ gr} - 247 \text{ gr})}{1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} * \pi * (2.5 \text{ cm})^2} = \frac{138}{19.63} \text{ cm} = 7.03 \text{ cm}$$

$$b_{60-80} = \frac{2 * (324 \text{ gr} - 249 \text{ gr})}{1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} * \pi * (2.5 \text{ cm})^2} = \frac{150}{19.63} \text{ cm} = 7.64 \text{ cm}$$

$$b_{80-100} = \frac{2 * (325 \text{ gr} - 250 \text{ gr})}{1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} * \pi * (2.5 \text{ cm})^2} = \frac{150}{19.63} \text{ cm} = 7.64 \text{ cm}$$

La sumatoria de las láminas de agua en el suelo sin cultivo será:

$$\sum_{i=1}^5 b_i = 29.7 \text{ cm}$$

Rpta:

Luego, el tirante o lámina de agua existente en el área sin cultivar, para la capa de suelo de 100 cm de profundidad o espesor, será igual a 29.7 cm.

b) Calcular y comparar el contenido de agua, en las muestras tomadas en el suelo cultivado y sin cultivar:

Datos:

- Profundidad del suelo en análisis (C) = 20 cm
- Profundidad o espesor del cilindro muestreador (D) = 10 cm
- Muestra de suelo de forma cilíndrica de radio (r) = 2.5 cm
- Profundidad de suelo a evaluar (P) = 100 cm

El cálculo para determinar la lámina de agua del suelo, con cultivo, se efectúa mediante la relación anterior:

$$b_j = \frac{2 * (M_{tj} - M_{sj})}{\rho_w * \pi * r^2}$$

Reemplazando datos para el cálculo de cada capa o estrato, se obtiene:

$$b_{0-20} = \frac{2 * (239 \text{ gr} - 230 \text{ gr})}{1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} * \pi * (2.5 \text{ cm})^2} = \frac{18}{19.63} \text{ cm} = 0.92 \text{ cm}$$

$$b_{20-40} = \frac{2 * (265 \text{ gr} - 241 \text{ gr})}{1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} * \pi * (2.5 \text{ cm})^2} = \frac{48}{19.63} \text{ cm} = 2.44 \text{ cm}$$

$$b_{40-60} = \frac{2 * (272 \text{ gr} - 245 \text{ gr})}{1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} * \pi * (2.5 \text{ cm})^2} = \frac{54}{19.63} \text{ cm} = 2.75 \text{ cm}$$

$$b_{60-80} = \frac{2 * (278 \text{ gr} - 248 \text{ gr})}{1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} * \pi * (2.5 \text{ cm})^2} = \frac{60}{19.63} \text{ cm} = 3.06 \text{ cm}$$

$$b_{80-100} = \frac{2 * (280 \text{ gr} - 250 \text{ gr})}{1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} * \pi * (2.5 \text{ cm})^2} = \frac{60}{19.63} \text{ cm} = 3.06 \text{ cm}$$

La sumatoria de las láminas de agua en el suelo con cultivo será:

$$\sum_{j=1}^5 b_j = 12.20 \text{ cm}$$

Finalmente, el cálculo y comparación de los contenidos de agua, en las muestras tomadas en el suelo cultivado y sin cultivar, arroja lo siguiente:

$$\sum_{i=1}^5 b_i - \sum_{j=1}^5 b_j = 29.70 \text{ cm} - 12.20 \text{ cm} = 17.50 \text{ cm}$$

Rpta:

Lo cual significa que el suelo sin cultivo tiene una lámina de agua de 17.50 cm, mayor que el suelo con cultivo, para una profundidad de 100 cm.

Importante tomar en cuenta:

Si se considera un **suelo arenoso** con un contenido de humedad de 10 volumen % y se compara con un suelo arcilloso con un contenido de humedad volumétrico de 23%; el suelo arcilloso tiene mayor cantidad total de agua retenida, pero su grado de disponibilidad hacia las plantas es menor que en el suelo arenoso, lo cual se puede comprobar fácilmente al tacto: El suelo arcilloso estará más seco al tacto que el arenoso. Por ello, es conveniente que se tenga presente que el nivel de humedad de un suelo para ser usado como elemento de decisión en el riego de los cultivos se debe definir en términos energéticos; es decir, en términos de cantidad de trabajo que tiene que desarrollar la planta, a fin de obtener el agua necesaria para desarrollar sus funciones fisiológicas.

2.1.2 Disponibilidad del agua en el suelo

La cantidad de agua disponible en el suelo para ser utilizada por las plantas está comprendida entre el rango de humedad a capacidad de campo (CC, 0.33 bares) y el punto de marchitez permanente (PMP, 15 bares). Si se mantuviera el contenido de humedad del suelo a un nivel mayor que la CC, existe el peligro de que la falta de aire en el suelo sea un factor limitante para el normal desarrollo de las plantas. Esto ocurre en un suelo con

drenaje restringido o a niveles de humedad cercanos al PMP, y producirá daños irreversibles al cultivo a nivel fisiológico. En efecto, si este nivel de humedad persiste, las plantas morirán.

a) Capacidad de campo (CC)

Se define como capacidad de campo a la máxima capacidad de retención de agua de un suelo sin problemas de drenaje, y que se alcanza según la textura del suelo entre las 6 y 72 horas después de un riego pesado o una lluvia que permitió saturar momentáneamente al suelo. Es decir, cuando la percolación o drenaje del agua gravitacional haya, prácticamente, cesado.

Para condiciones de evapotranspiración nula, también se puede definir a la capacidad de campo como el contenido de humedad del suelo cuando $\left(\frac{\Delta\theta}{\Delta t}\right) \rightarrow 0$ (variación del contenido de humedad con respecto al tiempo tiende a cero). También se puede decir que el contenido de humedad a capacidad de campo es aquel que corresponde a un estado energético del agua en el suelo de aproximadamente 0.33 bares para un suelo pesado (arcilloso) y de 0.10 bares para un suelo de textura gruesa (arenoso).

b) Punto de marchitez permanente (PMP)

Es el contenido de humedad del suelo en el cual la planta manifiesta síntomas de marchitamiento, caída de hojas, escaso desarrollo o fructificación, debido a un flujo muy lento de agua del suelo hacia la planta; y que, en promedio, corresponde a un estado energético de 15 bares cercano a éste valor defendiendo del tipo de cultivo.

Para que se produzca un flujo de agua, es necesaria la presencia de una gradiente de potencial. La magnitud del flujo está determinada tanto por la propia gradiente, así como por la conductividad hidráulica del suelo. Durante el proceso de transpiración, la gradiente se establece a través de cuatro medios distintos: suelo, raíz, hoja y atmósfera.

En el Cuadro N°1, se presentan diferentes tipos de texturas de suelo y los rangos de espacio poroso, densidad aparente, CC, PMP y la humedad total aprovechable. Esta información ha sido tomada de Israelsen y Hansen (1962).

Cuadro N° 1.- Resumen de las propiedades físicas de los suelos

Textura del suelo	Total de espacio poroso o porosidad total (%)	Densidad aparente D_{ap} (gr/cm ³)	Capacidad de campo θ_{cc} (%)	Punto de marchitez permanente θ_{pmp} (%)	Humedad total aprovechable		
					Peso seco $(\theta_{cc} - \theta_{pmp})$ (%)	Volumen $(\theta_{cc} - \theta_{pmp}) * D_{ap}$ (%)	cm/m
Arenoso	38 (32-42)	1.65 (1.55-1.80)	9 (6-12)	4 (2-6)	5 (4-6)	8 (6-10)	8 (6-10)
Franco arenoso	43 (40-47)	1.50 (1.40-1.60)	14 (10-18)	6 (4-8)	8 (6-10)	12 (9-15)	12 (9-15)
Franco	47 (43-49)	1.40 (1.35-1.50)	22 (18-26)	10 (8-12)	12 (10-14)	17 (14-20)	17 (14-20)
Franco arcilloso	49 (47-51)	1.35 (1.30-1.40)	27 (23-31)	13 (11-15)	14 (12-16)	19 (16-22)	19 (16-22)
Arcilloso arenoso	51 (49-53)	1.30 (1.25-1.35)	31 (27-35)	15 (13-17)	16 (14-18)	21 (18-23)	21 (18-23)
Arcilloso	53 (51-55)	1.25 (1.20-1.30)	35 (31-39)	17 (15-19)	18 (16-20)	23 (20-25)	23 (20-25)

Otros autores refieren que un suelo arcilloso, franco y arenoso tiene valores de porosidad que varían entre 53% - 61%, 47% - 53% y 30% - 47% respectivamente.

c) Humedad aprovechable total (HAT)

Es la diferencia que existe entre los contenidos de humedad del suelo a capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP). Este concepto es conocido también en la literatura como humedad útil, humedad disponible, humedad total utilizable, reserva útil, etc. La expresión matemática de la humedad aprovechable total del suelo expresada en vol% está dada por la relación:

$$\text{HAT (\%)} = \theta_{cc} (\%) - \theta_{pmp} (\%) \quad \dots\dots\dots (18)$$

Donde:

HAT (%) : Humedad aprovechable total o agua disponible total en la capa enraizada del suelo, (Vol %),

$\theta_{cc} (\%)$: Contenido de humedad a capacidad de campo, en base a volumen de agua (Vol %), y

$\theta_{pmp} (\%)$: Contenido de humedad a punto de marchitez permanente, en base a volumen de agua (Vol %).

La ecuación anterior puede expresarse en términos de lámina de agua aprovechable total del suelo, mediante la siguiente relación:

$$La = \frac{[\theta_{cc}(\%) - \theta_{pmp}(\%)] * Prof}{100} \dots\dots\dots (19)$$

Donde:

La : Lámina de agua aprovechable total en la capa enraizada del suelo, (cm),

$\theta_{cc} (\%)$: Contenido de humedad a capacidad de campo, en base a volumen de agua (Vol %),

$\theta_{pmp} (\%)$: Contenido de humedad a punto de marchitez permanente, en base a volumen de agua (Vol %), y

Prof : Profundidad o espesor de la capa enraizada de suelo (cm).

Si el contenido de humedad en volumen (θ_v) es igual al contenido de humedad en masa (θ_m) relacionado con la densidad aparente (D_{ap}) y el peso específico del agua, se tendrán las siguientes relaciones:

$$\theta_{cc}(\%) = \frac{\theta_{mcc}(\%) * D_{ap}}{\rho_w} \quad y \quad \theta_{pmp}(\%) = \frac{\theta_{mpmp}(\%) * D_{ap}}{\rho_w}$$

Reemplazando ambas relaciones en la ecuación (13), se obtiene:

$$La = \left[\frac{\theta_{mcc}(\%) - \theta_{mpmp}(\%)}{100} \right] * \frac{D_{ap} * Prof}{\rho_w} \dots\dots\dots (20)$$

Donde:

- La** : Lámina de agua aprovechable total en la zona de raíces del suelo (cm),
- $\theta_{\text{mcc}}(\%)$: Contenido de humedad a capacidad de campo en base a masa o peso de agua (%),
- $\theta_{\text{mpmp}}(\%)$: Contenido de humedad a punto de marchitez permanente en base a masa o peso de agua (%),
- Prof** : Profundidad o espesor de capa enraizada del suelo (cm),
- D_{ap} : Densidad aparente del suelo (g/cm^3), y
- ρ_w : Densidad del agua, equivalente a 1 g/cm^3

Si la profundidad de la zona enraizada está compuesta por diferentes capas con características específicas, la humedad aprovechable total del suelo (La) se calcula mediante la siguiente relación:

$$La = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\theta_{\text{cc}_i}(\%) - \theta_{\text{pmp}_i}(\%)}{100} \right] * \text{Prof}_i \dots\dots\dots(21)$$

Donde:

- La** : Humedad aprovechable total en la zona de raíces, (cm);
- $\theta_{\text{mcc}_i}(\%)$: Contenido de humedad a capacidad de campo de la capa **i**, (Vol %);
- $\theta_{\text{mpmp}_i}(\%)$: Contenido de humedad a punto de marchitez permanente de la capa **i** (Vol %);
- Prof_i** : Espesor de la capa enraizada **i**, (cm);
- n** : Número de capas en que se divide la zona enraizada que se analiza.

Otra forma de expresar la ecuación (15), en términos de masa o peso seco de suelo, es la siguiente:

$$La = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\theta_{\text{mcc}_i}(\%) - \theta_{\text{mpmp}_i}(\%)}{100} \right) * \frac{D_{\text{ap}_i} * \text{Prof}_i}{\rho_w} \dots\dots\dots(22)$$

Donde:

- $\theta_{mcc_i}(\%)$: Contenido de humedad a capacidad de campo en base a masa o peso de agua de la capa i , (masa %);
- $\theta_{mpmp_i}(\%)$: Contenido de humedad a punto de marchitez permanente en base a masa o peso de agua de la capa i , (masa %);
- Prof_i** : Espesor de la capa enraizada i , (cm);
- D_{ap_i}** : Densidad aparente del suelo de la capa i , (g/cm³);
- ρ_w : Densidad del agua equivalente a, 1 g/cm³;
- n** : Número de capas en que se divide la zona enraizada que se analiza.

También es necesario resaltar que el agua no es igualmente aprovechable por el cultivo en todo el rango de la humedad disponible. A medida que disminuye el nivel de humedad del suelo, aumenta progresivamente el esfuerzo del cultivo para extraer agua del suelo, afectando de esta manera la velocidad de uso del agua por el cultivo y, consecuentemente, la producción del mismo. Por lo anteriormente expuesto, en el riego de los cultivos no se debe permitir un agotamiento mayor del 40 al 60 % de la humedad aprovechable total, a fin de mantener un apropiado nivel de humedad para los cultivos, si se trata del riego por gravedad. En caso de riego por aspersión, el agotamiento debe ser mínimo; y en el caso del riego por goteo debe ser en lo posible cero, sobre todo hasta la etapa de maduración, dependiendo de la fisiología propia del cultivo que se maneje. En forma práctica, para el diseño de sistemas de riego por gravedad se usa el criterio de aplicar un riego cuando se produce un agotamiento o descenso del 50% de la humedad aprovechable total, que expresado matemáticamente es de la forma:

$$\boxed{L_{\text{riego}} = 0.5 * La} \dots\dots\dots (23)$$

Donde:

- L_{riego}** = Lámina neta de riego, expresada en las mismas unidades que “La” (cm), y
- La** = Humedad aprovechable total o agua disponible total (cm).

d) Profundidad de raíces

Todo cultivo tiene un determinado patrón de distribución de raíces. Este varía según la edad, las condiciones de humedad a las que ha sido sometido durante su período vegetativo, la naturaleza física del suelo y las características intrínsecas del perfil del suelo.

Las características físicas y en especial la textura y el nivel de humedad del suelo tienen una gran influencia en la profundidad de enraizamiento. En forma general, se puede decir que los suelos de textura gruesa permiten una mayor profundidad de las raíces, frente a los suelos de textura fina, que están en íntima relación con las capacidades diferentes de retención de agua de dichos suelos y a los niveles de humedad a que ha sido sometido el cultivo durante su período vegetativo. En el Cuadro N°2, se puede apreciar las profundidades de raíces de varios cultivos.

En forma general, se puede afirmar que, si la profundidad de enraizamiento promedio (P) de un cultivo cualquiera se divide en 4 partes iguales, el patrón de agua extraída por el cultivo según la profundidad, empezando de arriba hacia abajo, será de: 40%, 30%, 20% y 10%, respectivamente. En la siguiente figura, se presenta el patrón típico de la distribución de agua extraída por las raíces de un cultivo, para una profundidad enraizada P.

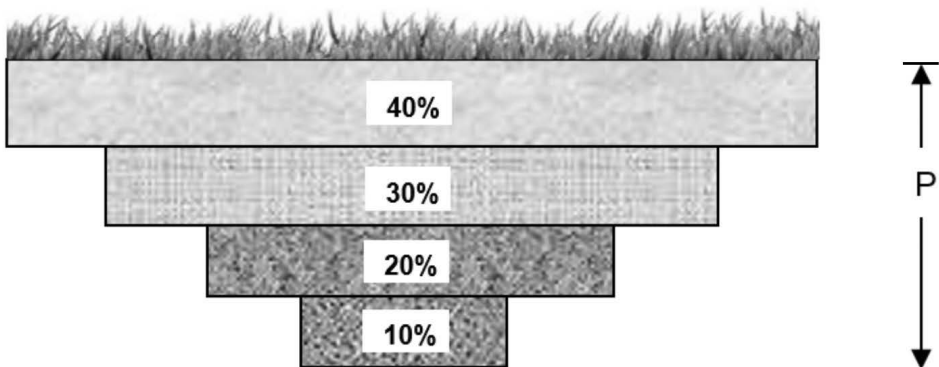


Figura N° 2. Patrón típico de la distribución de agua extraída por las raíces de un cultivo

e) Fracción del agua del suelo fácilmente disponible (f)

Aunque en teoría, el agua disponible para los cultivos en el suelo es la comprendida entre el contenido de humedad del suelo a capacidad de campo y el contenido de humedad del suelo a punto de marchitez permanente; en la realidad no todas las especies vegetales tienen la capacidad de extraer esa cantidad de agua, ni tampoco un agricultor va a esperar que el suelo se seque hasta el punto de marchitez permanente para aplicar un nuevo riego. Incluso algunas especies, como las hortalizas, pueden perecer cuando el contenido de humedad es cercano al punto de marchitez permanente. Por tal motivo, se ha introducido un factor de carácter fisiológico, característico de cada especie, que indica la fracción de la humedad aprovechable a partir de la cual el cultivo empieza a manifestar síntomas fisiológicos adversos (clorosis, disminución del crecimiento, disminución del rendimiento, marchitez, etc.). A este concepto, se le conoce como “fracción del agua del suelo fácilmente disponible” (f). En el Cuadro N°2, se proporciona una lista de valores característicos para diferentes especies vegetales.

f) Humedad fácilmente aprovechable (HFA)

De la definición anterior, se infiere que de la humedad aprovechable total (HAT), cada cultivo tiene la capacidad fisiológica de utilizar solamente una fracción del agua del suelo fácilmente disponible. A esta fracción, se le conoce como “Humedad fácilmente aprovechable” (HFA); y se expresa como:

$$\text{HFA}(\%) = f * [\theta_{cc}(\%) - \theta_{pmp}(\%)] \dots\dots\dots (24)$$

Donde:

- f** : Fracción del agua del suelo fácilmente aprovechable o disponible (Cuadro N°2)
- $\theta_{cc}(\%)$** : Contenido de humedad a capacidad de campo, en base a volumen de agua (Vol %), y
- $\theta_{pmp}(\%)$** : Contenido de humedad a punto de marchitez permanente, en base a volumen de agua (Vol %).

En el Cuadro N°2, se presenta una lista de cultivos con las fracciones de agua del suelo fácilmente disponible y los contenidos de humedad fácilmente aprovechables para 3 tipos de suelos y cultivos diferentes.

La ecuación anterior puede expresarse en términos de lámina de agua de la humedad fácilmente aprovechable (L_F), es decir:

$$L_F = \frac{HFA(\%)*Prof}{100 \%} = \frac{f*[\theta_{cc}(\%)-\theta_{pmp}(\%)]*Prof}{100 \%} \dots\dots\dots (25)$$

Si es que la lámina de agua de la humedad fácilmente aprovechable a capacidad de campo y a punto de marchitez en base a volumen de agua no lo expresamos en porcentaje, entonces la ecuación se expresaría de la siguiente forma:

$$L_F = f * (\theta_{cc} - \theta_{pmp}) * prof \dots\dots\dots (26)$$

Si es que la lámina de agua de la humedad fácilmente aprovechable a capacidad de campo y a punto de marchitez permanente **en base a peso ó masa** lo expresamos como porcentaje y sin porcentaje entonces estas dos ecuaciones se expresarían respectivamente de la siguiente forma:

$$L_F = f * [\theta_{mcc}(\%) - \theta_{mpmp}(\%)] * \frac{D_{ap} * prof}{\rho_w * 100} \dots\dots\dots (27)$$

$$L_F = f * (\theta_{mcc} - \theta_{mpmp}) * \frac{D_{ap} * prof}{\rho_w} \dots\dots\dots (28)$$

g) Volumen de agua disponible total en la capa de raíces

Conociendo la lámina de agua aprovechable o disponible total, se calcula el volumen de agua disponible o aprovechable total en la capa de raíces, mediante la relación:

$$La = \frac{[\theta_{mcc}(\%) - \theta_{mpmp}(\%)] * D_{ap} * Prof}{\rho_w * 100} \dots\dots\dots (29)$$

Luego, si “La” está expresada en mm, el volumen de agua disponible (V_{AD}) expresado en m³/ha está dado por la relación:

$$(V_{AD}) = 10 * La \dots\dots\dots (30)$$

Donde:

La : Lámina de agua disponible total, (mm), y

V_{AD} : Volumen de agua disponible total en la zona de raíces, (m³/ ha).

Cuadro N°2.- Profundidad de raíces, fracción del agua del suelo fácilmente disponible (f) y humedad fácilmente aprovechable (HFA) para diferentes texturas y cultivos, cuando ETP es de 5-6 mm/día.

Cultivos	Prof. raíces (m)	Fracción del agua fácilmente disponible en el suelo (f)	Humedad fácilmente aprovechable (HAF) para diferentes texturas(mm/m)		
			Fina	Mediana	Gruesa
Alfalfa	1.0 – 2.0	0.55	110	75	35
Plátano	0.5 – 0.9	0.35	70	50	20
Cebada	1.0 – 1.5	0.55	110	75	35
Frijol	0.5 – 0.7	0.45	90	65	30
Remolacha	0.6 – 1.0	0.50	100	70	35
Repollo	0.4 – 0.5	0.45	90	65	30
Zanahoria	0.5 – 1.0	0.35	70	50	20
Apio	0.3 – 0.5	0.20	40	25	10
Cítricos	1.2 – 1.5	0.50	100	70	30
Trébol	0.6 – 0.9	0.35	70	50	20

Cacao	0.7 – 2.1	0.20	40	30	15
Algodón	0.7 – 1.7	0.65	130	90	40
Pepino	0.7 – 1.2	0.50	100	70	30
Dátiles	1.5 – 2.5	0.50	100	70	30
Frut. Cad.	1.0 – 2.0	0.50	100	70	30
Lino	1.0 – 1.5	0.50	100	70	30
Granos	0.9 – 1.5	0.60	120	80	40
pequeños	1.0 – 2.0	0.35	70	50	20
Vid	0.5 – 1.5	0.50	100	70	30
Pastos					
Maní	0.5 – 1.0	0.40	80	55	25
Lechuga	0.3 – 0.5	0.30	60	40	20
Maíz	1.0 – 1.7	0.60	120	80	40
Melón	1.0 – 1.5	0.35	70	50	25
Olivo	1.2 – 1.7	0.65	130	95	45
Cebolla	0.3 – 0.5	0.25	50	35	15
Palmas	0.7 – 1.1	0.65	130	90	40
Lenteja	0.6 – 1.0	0.35	70	50	25
Ají	0.5 – 1.0	0.25	50	35	15
Piña	0.3 – 0.6	0.50	100	65	30
Papa	0.4 – 0.6	0.25	50	30	15
Sorgo	1.0 – 2.0	0.55	110	75	35
Soya	0.6 – 1.3	0.50	100	75	35
Espinaca	0.3 – 0.5	0.20	40	30	15
Fresas	0.2 – 0.3	0.15	30	20	10
Remol.	0.7 – 1.2	0.50	100	70	30
Azúcar	1.0 – 2.0	0.65	130	90	40
Caña de Azúcar					
Girasol	0.8 – 1.5	0.45	90	60	30
Camote	1.0 – 1.5	0.65	130	90	40
Tabaco	0.5 – 1.0	0.35	70	50	25
precoz	0.5 – 1.0	0.65	130	90	40
Tabaco	0.7 – 1.5	0.40	180	60	25
Tomate	0.3 – 0.6	0.20	40	30	15
Verduras trigo	1.0 – 1.5	0.55	105	70	35

¹ Si ETP es de 3-4mm/día o menos, aumentar en 30%. Cuando ETP es de 8 mm/día o más reducir los valores en un 30%.

Fuente: Doorenbos y Pruitt, 1988.

h) Intervalo de Riego (I_r)

El intervalo de riego (I_r) o frecuencia de riego (F_r) se define como el número de días transcurridos entre dos riegos consecutivos. Está determinado por el tipo de suelo, cultivo, clima o tasa de evapotranspiración potencial, precipitación efectiva, profundidad del suelo o profundidad de las raíces, entre otros. El intervalo de riego se define mediante la expresión siguiente:

$$I_r = \frac{La}{ETP - Pe} \quad \dots\dots\dots (31)$$

Donde:

I_r = Intervalo o frecuencia de riego (días),

La = Lámina de agua a restituir (mm),

ETP = Evapotranspiración potencial media en el período considerado (mm/día), y

Pe = Precipitación efectiva media, en el período considerado (mm/día).

Muchas veces, el intervalo de riego está determinado por las condiciones de operación del sistema de riego, y no obedece sólo a los factores fisiológicos del cultivo. Con sistemas de riego presurizado, es posible aplicar riegos con la frecuencia deseada por el productor quien, por razones económicas, prefiere aplicar los riegos con la máxima frecuencia posible para garantizar el desarrollo potencial de los cultivos. En tales casos, el objetivo planteado es la determinación de las láminas de agua necesarias para restituir la humedad a los niveles establecidos. En este caso, la ecuación anterior se expresa de la siguiente manera:

$$La = I_r * (ETP - Pe) \quad \dots\dots\dots (32)$$

i) Eficiencia, láminas netas, láminas brutas y tiempo de riego

El tema de eficiencia de riego se discute con amplitud en el capítulo VI, sin embargo se introduce la noción para la concepción de las necesidades netas y brutas de riego. Por diferentes razones, muchas veces no es posible aplicar de manera precisa las necesidades de riego calculadas (La). Generalmente,

se requieren cantidades mayores de agua (L_b) para compensar las pérdidas por aplicación atribuibles generalmente al sistema y método de riego. La relación entre la lámina requerida o neta (L_n) y la lámina necesaria de aplicar o lámina bruta (L_b) para compensar las pérdidas, se le conoce como la eficiencia de aplicación (E_a).

$$E_a = \frac{L_n}{L_b} \quad \dots\dots\dots (33)$$

Donde:

E_a = Eficiencia de aplicación,

L_n = Lámina neta o requerida (mm), y

L_b = Lámina bruta (mm)

Luego, la lámina de agua necesaria a ser aplicada en el riego se determina de la manera siguiente:

$$L_b = \frac{L_n}{E_a} \quad \dots\dots\dots (34)$$

El tiempo neto de riego (T_r) se denomina también como tiempo de aplicación. Se calcula como la relación entre la lámina neta de riego (L_n) y la velocidad de infiltración básica (I_b) y su relación es la siguiente:

$$T_r = \frac{L_n}{I_b} \quad \dots\dots\dots (35)$$

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

Problema N°1

Se tiene un campo cultivado, homogéneo en profundidad y en textura cuyo contenido de humedad sobre la base de masa o peso de agua en una muestra de suelo θ_m (%) disminuye desde 27.3% hasta 14.8%, en un lapso de 19 días. La densidad aparente del suelo es de 1.42 g/cm³ y la profundidad de raíces es de 72 cm. Calcular:

- a) La lámina de agua a ser restituida en un riego en el campo cultivado, y
- b) La tasa de evapotranspiración promedio del cultivo.

Solución:

a) Lámina de agua a ser restituida en el riego del campo cultivado

Datos:

$$\theta_{mo} (\%) = 27.3 \text{ masa } \%$$

$$\theta_{mf} (\%) = 14.8 \text{ masa } \%$$

$$D_{ap} = 1.42 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{Prof} = 72 \text{ cm}$$

$$\rho_w = 1 \text{ g/cm}^3$$

El cálculo de la lámina de agua (La) a ser restituida en el riego se determina mediante la relación:

$$La = \frac{[\theta_{mo}(\%) - \theta_{mf}(\%)]}{100} * \frac{D_{ap} * \text{Prof}}{\rho_w}$$

Reemplazando los datos en la fórmula anterior, se obtiene:

$$La = \frac{(27.3 \% - 14.8 \%)}{100} * \frac{1.42 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} * 72 \text{ cm}}{1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}}$$

$$La = \frac{12.5 \%}{100} * \frac{1.42 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} * 72 \text{ cm}}{1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}}$$

$$\mathbf{La = 12.78 \text{ cm}}$$

La lámina de agua a ser restituida en el riego es de:

Rpta: **La = 12.78 cm**

b) Tasa promedio de evapotranspiración promedio del cultivo

Datos:

- Período de tiempo es de 19 días
- La lámina de agua consumida o perdida es de 12.78 cm ó 127.8 mm

Luego, la tasa de evapotranspiración promedio (E_t), según los datos anteriores será:

$$E_t = \frac{127.8 \text{ mm}}{19 \text{ días}} = 6.7 \text{ mm/día}$$

Rpta:

$$E_t = 6.7 \text{ mm/día}$$

Problema N°2

Las características en la zona de raíces de un suelo estratificado y cultivado con algodón que tiene una profundidad de raíces de 80 cm es la siguiente:

Estrato (cm)	Textura	$\theta_{mcc}(\%)$ (masa, %)	$\theta_{mpmp}(\%)$ (masa, %)	D_{ap} (g/cm ³)
0 - 19	Franco-limoso	34.5	17.5	1.57
19 - 37	Franco-limoso	34.8	21.6	1.63
37 - 67	Arenoso	30.7	18.8	1.60
67 - 80	Arenoso	31.1	16.8	1.60

Se pide determinar la cantidad total de agua disponible en la zona de raíces

Solución:

El cálculo de la lámina total de agua disponible (L_a) para cada estrato relaciona la humedad a capacidad de campo (θ_{mcc}) y el punto de marchitez, (θ_{mpmp}) sobre la base de peso o masa de agua en una muestra de suelo, la densidad aparente (D_{ap}), la profundidad de raíces del cultivo en estudio (prof) y el peso específico del agua ($\rho_w = 1 \text{ g/cm}^3$). La ecuación que relaciona estas variables es la siguiente:

$$La = \sum_{i=1}^n (\theta_{mcc_i} - \theta_{mpmp_i}) * \frac{D_{api} * Prof_i}{\rho_w}$$

Según la relación anterior, se calculan las láminas parciales de agua de cada estrato:

$$La_{0-19} = (0.345 - 0.175) * \frac{1.57 \frac{g}{cm^3} * 19 \text{ cm}}{1 \frac{g}{cm^3}} = 5.07 \text{ cm}$$

$$La_{19-37} = (0.348 - 0.216) * \frac{1.63 \frac{g}{cm^3} * 18 \text{ cm}}{1 \frac{g}{cm^3}} = 3.87 \text{ cm}$$

$$La_{37-67} = (0.307 - 0.188) * \frac{1.60 \frac{g}{cm^3} * 30 \text{ cm}}{1 \frac{g}{cm^3}} = 5.71 \text{ cm}$$

$$La_{67-80} = (0.311 - 0.168) * \frac{1.60 \frac{g}{cm^3} * 13 \text{ cm}}{1 \frac{g}{cm^3}} = 2.97 \text{ cm}$$

Luego, la lámina de agua disponible total en la zona de raíces será:

$$La = 5.07 \text{ cm} + 3.87 \text{ cm} + 5.71 \text{ cm} + 2.97 \text{ cm} = 17.62 \text{ cm}$$

Rpta: **La = 17.62 cm**

Problema N°3

Si transcurrido un lapso de 13 días después de alcanzadas las condiciones de equilibrio, los contenidos de agua en el suelo a capacidad de campo y punto de marchitez sobre la base de peso de agua en una muestra de suelo en los diferentes estratos y textura son los siguientes:

Estrato (cm)	Textura	$\theta_{mcc}(\%)$ (masa, %)	$\theta_{m13}(\%)$ (masa, %)	D_{ap} (g/cm ³)
0 - 19	FAL	34.5	22.3	1.57
19 - 37	A	34.8	27.1	1.63
37 - 67	A	30.7	28.9	1.60
67 - 80	FAL	31.1	30.9	1.60

Sobre la base de la información anterior, calcular:

- Lámina de agua consumida hasta el 13° día en los primeros 80 cm de suelo, y
- La tasa de evapotranspiración promedio diaria del cultivo hasta el 13° día.

Solución:

- Lámina de agua consumida hasta el 13° día en los primeros 80 cm de suelo**

Datos:

- Se tiene las dimensiones de cada estrato, la textura, el contenido de humedad en base a peso de agua, capacidad de campo, humedad al 13° día y la densidad aparente de cada estrato de suelo.

El cálculo de la lámina de agua (La) para cada estrato relaciona la capacidad de campo (θ_{mcc}) y el contenido de humedad al día 13 ($\theta_{m13}(\%)$) en base a peso de agua, densidad aparente (D_{ap}), la profundidad del suelo en estudio (Prof) y el peso específico del agua ($\rho_w = 1 \text{ g/cm}^3$). La ecuación que relaciona estas variables es la siguiente:

$$La = \sum_{i=1}^n \left(\theta_{mcc_i} - \theta_{mpmp_i} \right) * \frac{D_{ap_i} * Prof_i}{\rho_w}$$

Según la relación anterior y los datos de cada estrato, se calculan las láminas parciales de agua de cada estrato:

$$La_{0-19} = (0.345 - 0.223) * \frac{1.57 \frac{g}{cm^3} * 19 \text{ cm}}{1 \frac{g}{cm^3}} = 3.63 \text{ cm}$$

$$La_{19-37} = (0.348 - 0.271) * \frac{1.63 \frac{g}{cm^3} * 18 \text{ cm}}{1 \frac{g}{cm^3}} = 2.26 \text{ cm}$$

$$La_{37-67} = (0.307 - 0.289) * \frac{1.60 \frac{g}{cm^3} * 30 \text{ cm}}{1 \frac{g}{cm^3}} = 0.86 \text{ cm}$$

$$La_{67-80} = (0.311 - 0.309) * \frac{1.60 \frac{g}{cm^3} * 13 \text{ cm}}{1 \frac{g}{cm^3}} = 0.04 \text{ cm}$$

La lámina de agua consumida hasta el 13° día en la zona de raíces de los 80 cm será:

$$La = 3.63 \text{ cm} + 2.26 \text{ cm} + 0.86 \text{ cm} + 0.04 \text{ cm} = 6.79 \text{ cm}$$

Rpta: La = 6.79 cm

b) La tasa de evapotranspiración promedio diaria del cultivo hasta el 13° día

Datos:

- Periodo de tiempo transcurrido después de alcanzadas las condiciones de equilibrio es de 13 días.
- La lámina de agua consumida hasta el 13° día es es 6.79 cm ó 67.9 mm.

Luego, la tasa de evapotranspiración promedio diaria (E_t), según los datos anteriores, será:

$$E_t = \frac{67.9 \text{ mm}}{13 \text{ días}} = 5.2 \text{ mm/día}$$

Rpta: $E_t = 5.2 \text{ mm/día}$

Problema N°4

Calcular la lámina de agua de la humedad fácilmente aprovechable (HFA) de un campo con cultivo de algodón cuya profundidad de raíces es de 80 cm, y si el contenido de humedad sobre la base del peso de agua en una muestra de suelo a capacidad de campo (θ_{mcc}) es de 0.273 y el punto de marchitez permanente (θ_{mpmp}) es 0.148. También se sabe que D_{ap} es 1.28 g/cm^3 .

Solución:

Datos:

Cultivo del Algodón.

$$\theta_{mcc} = 0.273 \quad \theta_{mpmp} = 0.148 \quad D_{ap} = 1.28 \text{ g/cm}^3 \quad \text{Prof} = 80 \text{ cm}$$

La lámina de agua de la humedad fácilmente aprovechable (L_F) se calculará mediante la relación:

Dónde:

$$L_F = f * (\theta_{mcc} - \theta_{mpmp}) * \frac{D_{ap} * \text{Prof}}{\rho_w}$$

θ_{mcc} : Contenido de humedad a capacidad de campo en base a peso de agua,

θ_{mpmp} : Contenido de humedad a punto de marchitez permanente en base a peso de agua,

Prof : Profundidad de la capa enraizada del suelo (cm),

D_{ap} : Densidad aparente del suelo (g/cm^3),

f : Fracción del agua del suelo fácilmente disponible,

ρ_w : Densidad del agua, equivalente a 1 g/cm^3 , y

L_F : Lámina de agua de la humedad fácilmente aprovechable.

El cálculo del valor de “f” se realiza mediante el Cuadro N°2; de donde se obtiene que la fracción de agua fácilmente disponible en el suelo de un campo con cultivo de algodón es: 0.65.

Reemplazando valores en la relación anterior, se obtiene:

$$L_F = f * (\theta_{mcc} - \theta_{mmp}) * \frac{D_{ap} * Prof}{\rho_w}$$

$$L_F = 0.65 * (0.273 - 0.148) * \frac{1.28 \frac{g}{cm^3} * 80cm}{1 \frac{g}{cm^3}}$$

Rpta: **LF = 8.32 cm**

Problema N°5

Un suelo tiene un contenido de humedad inicial en base a volumen $\theta_v = 0.10$ y un contenido de humedad a capacidad de campo en base a volumen $\theta_{cc} = 0.30$. Determinar qué profundidad de suelo humedecerá una lámina de 10 cm de lluvia.

Solución:

Datos:

- $\theta_v = 0.10$ (humedad inicial en base a volumen).
- $\theta_{cc} = 0.30$ (humedad a capacidad de campo en base a volumen).
- Lámina de agua aplicada con la lluvia: 10 cm.
- Profundidad de suelo, C =?

Con la siguiente relación, se calcula la lámina de agua en la capa (C) de suelo:

$$b = \theta_v * C$$

Donde:

- θ_v : Contenido de humedad en base a volumen,
- b** : Lámina de agua expresada en las mismas unidades, de la profundidad del suelo (cm),

C : Profundidad de la capa de suelo de la cual se quiere evaluar su contenido de humedad, (cm).

Si bien es cierto que el suelo tiene inicialmente una humedad inicial en base a volumen de $\theta_v = 0.10$; cuando inicia la lluvia, el agua cae a la superficie del suelo, por lo que el contenido de humedad se incrementa hasta llegar a capacidad de campo ($\theta_{cc} = 0.30$). Una vez que llega a capacidad de campo el resto de agua que seguía cayendo ya no puede retenerse en la parte superior por lo que empieza a profundizar las partes más bajas de la superficie. Este proceso mencionado continúa hasta que los 10 cm de agua han terminado de caer. En conclusión los 10 cm de agua de lluvia habrán recorrido una profundidad de suelo “C” y en esa profundidad de suelo “C” la humedad en base a volumen se encontrará a capacidad de campo; por lo que el agua que se encuentra en esta profundidad de suelo “C” se podrá determinar de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} b_2 &= \theta_{cc} * C \\ b_2 &= 0.30 * C \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (1)$$

Sabemos que la humedad en base a volumen inicialmente en esta misma profundidad de suelo “C” era $\theta_v = 0.10$ por lo que se puede hallar esta lámina inicial de agua que se encontraba en la profundidad de suelo “C” de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} b_1 &= \theta_v * C \\ b_1 &= 0.10 * C \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (2)$$

Sabemos que con los 10 cm de lluvia que recorrieron la profundidad de suelo “C” se logró incrementar la humedad volumétrica de 0.10 hasta los 0.30 por lo tanto se puede decir que la diferencia entre la lámina de agua a capacidad de campo ($\theta_{cc} = 0.30$) en la profundidad de suelo “C” menos la lámina de agua inicial ($\theta_v = 0.10$) es igual a los 10 cm de lluvia:

$$b_2 - b_1 = 10 \text{ cm}$$

$$0.30 * C - 0.10 * C = 10 \text{ cm}$$

$$0.20 * C = 10 \text{ cm}$$

$$C = \frac{10 \text{ cm}}{0.20}$$

$$C = 50 \text{ cm}$$

Rpta:

La humedad de suelo humedecido con los 10 cm de lluvia será de 50 cm.

En el cuadro N°3, se presentan datos referenciales de algunas propiedades físicas del suelo, que en el caso que no se dispongan de cifras de campo, bien pueden ser usadas.

Cuadro N° 3.- Datos representativos de algunas propiedades físicas del suelo

TEXTURA DEL SUELO	Velocidad de infiltración básica (mm/ hora)	Densidad aparente (D_{ap}) (g/cm³)	Capacidad de campo (θ_{mcc}) (masa %)	Punto de marchitez permanente (θ_{mpmp}) (masa %)	Agua disponible total (Vol %)
Arenosa	(20 - 300)	1.70 (1.60 - 1.80)	11 (7 - 14)	3 (1 - 5)	12 (9 - 16)
Franca- Arenosa	(15 - 70)	1.50 (1.45 - 1.60)	14 (12 - 17)	5 (3 - 7)	14 (13 - 16)
Franca	(10 - 25)	1.40 (1.35 - 1.45)	21 (16 - 24)	9 (7 - 11)	15 (12 - 19)
Franca- Arcillosa	10 (3 - 18)	1.35 (1.30 - 1.40)	26 (23 - 30)	12 (10 - 14)	19 (16 - 22)
Arcillosa	1.0 (0.1 - 2.0)	1.20 (1.15 - 1.25)	34 (30 - 38)	16 (14 - 18)	22 (18 - 25)

Problema N° 6:

Calcular la lámina neta y total de riego necesaria para humedecer un suelo hasta la profundidad de 30 cm, si se conoce que su contenido de humedad a capacidad de campo es de 22.8 masa % y su contenido de humedad actual es de 18.1 masa %. Además, su densidad aparente es de 1.42 gr/cm³ y la eficiencia de riego es de 65%.

Solución:

Datos:

$$\theta_{mcc} = 0.228 ; \quad \theta_m = 0.181 ; \quad D_{ap} = 1.42 \text{ g/cm}^3 ; \quad \text{Prof} = 30 \text{ cm}$$

La lámina de agua (lámina neta) que se necesita reponer para que el suelo llegue a capacidad de campo se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$La = (\theta_{mcc} - \theta_m) * \frac{D_{ap} * \text{Prof}}{\rho_w}$$

Reemplazando valores en la relación anterior, se obtiene:

$$La = (0.228 - 0.181) * \frac{1.42 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} * 30 \text{ cm}}{1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}}$$

$$\therefore \boxed{La = 2.00 \text{ cm}}$$

Para calcular la lámina total de riego hay que tomar en cuenta la eficiencia de riego que según datos del problema es igual a 65%.

$$L_{\text{riego}} = \frac{L_a}{E_{f_{\text{riego}}}}$$

$$L_{\text{riego}} = \frac{2.00 \text{ cm}}{0.65}$$

Rpta: $L_{\text{riego}} = 3.08 \text{ cm}$

2.1.3 Métodos para determinar el contenido de humedad del suelo

La determinación del contenido de humedad de un suelo puede hacerse mediante los métodos: directo e indirectos.

a) Método directo o gravimétrico

Representa el método estándar para determinar el contenido de humedad del suelo, y sirve de base para el empleo de los métodos indirectos. El método y equipos usados son simples, y se pueden aplicar en todos los suelos. Su práctica tiene los siguientes pasos:

- Toma de la muestra de suelo del terreno o campo que se quiere conocer su contenido de humedad. El peso de la muestra varía entre los 20 a 200 gramos.
- La muestra se puede colocar en tarritos de aluminio con tapa hermética codificada o en todo caso, aunque no es lo mejor, en pequeñas bolsas de plástico que deben llevar una etiqueta de identificación, con el nombre del usuario y del campo, fecha de muestreo, profundidad de suelo y el número del punto de muestreo correspondiente.
- En el laboratorio, en caso que se use tarritos, el vapor que se condense en el interior del recipiente deberá incluirse cuando se pese y en la determinación de la humedad. Las muestras húmedas que proceden de bolsitas plásticas se colocan en tarritos de peso conocido, y luego se pesan.

Las muestras húmedas pesadas se secan en estufa durante 24 horas y a una temperatura de 105°C para luego volver a ser pesadas. La diferencia de peso que se registre se deberá a la pérdida de agua. Esta diferencia se divide por el peso del suelo seco para obtener así el contenido de humedad basado en el peso seco. Es necesario mantener la identificación de los tarritos en todo momento del proceso de determinación del contenido de humedad. Éstos deben estar destapados durante el proceso de secado. También puede secarse la muestra de suelo en un microondas, con lo cual el tiempo de secado se reduce a 5 ó 10 minutos aproximadamente. El contenido de humedad se calcula mediante la relación:

$$\theta_{\text{masa}} (\%) = \frac{\text{masa de agua}}{\text{masa de suelo seco}} * 100 \quad \dots\dots\dots (36)$$

Este método directo es el método base y el único método usado para la calibración de cualquier equipo utilizado en los métodos indirectos. Su desventaja es el tiempo que demora en su aplicación y el costo que significa.

Un avance apropiado en el muestreo de campos de cultivo es de unos 30 puntos de muestreo/tarea y cada punto a 3 profundidades de suelo (máximo hasta los 90 a 120 cm), y con una intensidad de un punto por hectárea. Si los puntos están concentrados, pueden hacerse hasta unos 80-90 puntos/tarea y a tres profundidades de suelo, como mínimo.

b) Métodos indirectos

Dentro de estos métodos, se tienen principalmente: método de la resistencia eléctrica, del tensiómetro y de la sonda de neutrones. La utilización de cualquiera de estos requiere de la obtención previa de su curva de calibración respectiva. Para ello, se utiliza el método gravimétrico como base.

- **Método de la resistencia eléctrica**

Este método se basa en el principio de que la resistencia al paso de una corriente eléctrica depende del contenido de humedad del medio; a mayor contenido de humedad, menor es la resistencia que presenta el suelo. Este método utiliza dos electrodos que se hallan encerrados o cubiertos en bloques porosos absorbentes (de yeso de París, fibra de vidrio u otro material), que al ser enterrados en el suelo, a la profundidad deseada, tienden siempre a equilibrar su propio contenido de humedad con el del suelo.

Cuando se quiere conocer el contenido de humedad del suelo en un momento determinado, se mide la resistencia eléctrica entre los electrodos del block. Con esta lectura, se entra a la curva de calibración: resistencia eléctrica (Ohms) versus contenido de humedad, y se obtiene el contenido de humedad correspondiente.

La curva de calibración se consigue relacionando los contenidos de humedad obtenidos por el método gravimétrico y las lecturas de resistencia eléctrica correspondientes. El block de fibra de vidrio viene acompañado con un dispositivo que permite medir la temperatura del suelo. Sobre esa base, la resistencia puede ser corregida a una temperatura común.

Este método tiene la ventaja de ser barato en comparación con los otros métodos indirectos, además requiere poco esfuerzo. En cuanto a la desventaja más importante, se tiene que es poco preciso para trabajos de campo, y se ve afectado rápidamente por el grado de salinidad del suelo. Asimismo, no es apropiado usarlo en suelos arenosos debido a que la distribución del tamaño de poros del block es muy diferente a la que presenta un suelo arenoso.

- **Método del tensiómetro**

El tensiómetro es un instrumento que consta de una punta o copa porosa conectada a un manómetro o vacuómetro a través de un tubo de

plástico. Su longitud convencional varía entre 30 y 130 cm; aunque se puede construir también de mayores longitudes. El método se basa en la energía con que está retenida el agua en el suelo.

Una vez incorporado el tensiómetro en el suelo, la energía del agua retenida por el suelo entra en equilibrio con la energía del agua del tensiómetro a través de su copa porosa, conformando de esta manera un sistema cerrado. Las fuerzas que se crean en este circuito son transmitidas primero a la columna de agua del tubo y luego al dispositivo de medida o manómetro.

A medida que el suelo se seca, se produce un flujo de agua contenida en el tubo del tensiómetro hacia el suelo, lo que ocasiona una baja de su nivel y, por consiguiente, un correspondiente vacío, debido a la succión de agua por el suelo. Este fenómeno es registrado en el manómetro. En algunos tensiómetros la lectura es digital.

Con este método, sólo se puede medir contenidos de humedad correspondientes a tensiones menores de 0.8 bares, ya que a mayores tensiones se produce un ingreso de aire al sistema a través de la copa porosa y las lecturas que se puedan obtener son erradas.

- **Método de la sonda de neutrones**

Para determinar el contenido de humedad del suelo por este método, se utiliza una fuente radioactiva de neutrones rápidos (Radium-Beryllium o Americium-Beryllium), la que se introduce en el suelo a través de un tubo de aluminio o de PVC, previamente instalado. Se debe tener presente que dichos materiales responden en forma diferente al material radiactivo, en consecuencia la calibración de lecturas deberá efectuarse en forma separada.

Los neutrones de la fuente radioactiva se caracterizan por tener gran cantidad de energía que les permite movilizarse en el suelo con gran rapidez, y que al chocar con **iones hidrógeno** del agua, disminuyen su velocidad. De esta manera, alrededor de la fuente de neutrones rápidos

se forma un campo de neutrones lentos que son detectados por un contador ubicado en la fuente y que, electrónicamente, son indicados en una pantalla.

El número de neutrones lentos tiende a ser constante en un tiempo muy corto, 0.01 segundos, y su correspondiente número depende de la cantidad de agua en el suelo. Se ha constatado que existe una relación lineal entre el número de neutrones amortiguados y el contenido de humedad de la esfera de influencia del campo de trabajo (30 cm de diámetro).

Antes de proceder a la determinación del contenido de humedad por este método, se efectúa una prueba de calibración de la sonda de neutrones para obtener su correspondiente “curva de calibración” que se efectúa para cada profundidad y campo donde se va a trabajar. Con la lectura definitiva obtenida en el contador de la sonda, se va a la curva de calibración antes obtenida, y así se determina el contenido de humedad respectivo del suelo.

Este método tiene la ventaja de monitorear el contenido de humedad de un campo siempre en el mismo sitio; y, muy rápidamente (algunos minutos), se reduce la variabilidad de los datos obtenidos. Sus principales desventajas son: alto costo de inversión inicial, manejo delicado del equipo neutrónico; y requiere de especialistas para su manejo, mantenimiento y reparación.

En el método de la sonda de neutrones, se usa la siguiente ecuación para medir el contenido de humedad:

$$\theta_v = \left(\frac{R_s}{R_{std}} \right) * b - j \quad \dots\dots\dots (37)$$

Donde:

- θ_v : Contenido de humedad en base a volumen,
- R_s : Lectura del instrumento en el suelo en cuentas/minuto,
- R_{std} : Lectura estándar del instrumento en cuentas/minuto,
- b : Factor de calibración, y
- j : Factor de calibración.

La descripción de la ecuación indica que “b” y “j” son factores de calibración, R_s es la lectura del instrumento en el suelo y R_{std} es la lectura estándar del instrumento que es tomada en el momento de efectuar la medida. Para pruebas de calibración, se toman medidas en el campo de R_s , el valor de θ_v obtenido mediante el método gravimétrico y el valor dado como dato de R_{std} . Las incógnitas “b”, “j”, son determinadas a través de ecuaciones simultáneas que se generan por cada 2 medidas a distinta profundidad en una determinada área.

Se debe tener cuidado con el uso de la sonda de neutrones, porque también emite radiaciones que son peligrosas para la salud humana. Es mejor usar mandiles protectores contra las radiaciones y tarjetas personales de detección de radiación. El equipo de sonda de neutrones debe tener la señal de peligro de radiación. Además, el uso de la sonda de neutrones se ha vuelto cada vez más común para la determinación del contenido de humedad del suelo por ser preciso y rápido de aplicar.

- **Método de las ondas de radio**

Este método en la actualidad se está volviendo más eficaz y seguro que la sonda de neutrones, sin embargo es más costoso.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

Problema N°1

Una sonda de neutrones ha sido calibrada, el factor “b” es 0.30 y “j” igual a cero. Si en el suelo, la lectura de R_s es 4,000 por minuto y el valor standard del instrumento R_{std} es 5,000 por minuto, determinar el contenido de humedad sobre la base del volumen.

Solución:

Datos:

b : 0.30

j : 0

R_s : 4,000 por minuto

R_{std} : 5,000 por minuto

Aplicando la ecuación anterior y reemplazando valores, se obtiene:

$$\theta_v = \left(\frac{R_s}{R_{std}} \right) * b - j$$

$$\theta_v = \left(\frac{4,000}{5,000} \right) * 0.30 - 0$$

$$\theta_v = 0.24$$

Rpta:

El contenido de humedad en base a volumen será 0.24 ó 24%

Problema N°2

Los siguientes datos corresponden a un suelo sin cultivo, y ha sido seleccionado para calibrar una sonda de neutrones. Se ha tomado muestras de suelo cada 20 cm usando un auger hole (muestreador de suelo), las muestras tiene un diámetro de 5 cm y se han tomado valores de “**M_s**” (**peso de suelo seco**, en gramos) y de “**M_h**” (**peso de suelo húmedo**, en gramos). La densidad de partículas del suelo es de 2.65 gr/cm³. Los valores de **R_s** se indican en la tabla. (**R_{std} = 10,000**).

Profundidad (cm)	Suelo testigo		
	Peso de suelo húmedo (gramos)	Peso de suelo seco (gramos)	R _s
0-20	494	470	-
20-40	612	490	8,250
40-60	632	494	9,250
60-80	648	498	10,000
80-100	650	500	10,000

Determinar los factores de calibración **b** y **j**

Solución:

Datos:

$$\begin{aligned} L &= 20 \text{ cm} \\ \text{Radio (r)} &= 2.5 \text{ cm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D_r &= 2.65 \text{ gr/cm}^3 \\ R_{\text{std}} &= 10,000 \end{aligned}$$

Se tiene la siguiente relación del contenido de humedad expresada en volumen (θ_v):

$$\theta_v = \frac{\text{Volumen de agua}}{\text{Volumen total del suelo}} = \frac{V_a}{V_t}$$

Si se tiene, además, las siguientes relaciones:

$$V_a = \frac{M_a}{\rho_w} \quad ; \quad V_t = L * \pi * r^2 \quad \text{y} \quad M_a = M_h - M_s$$

Reemplazando valores en las relaciones anteriores, se obtiene:

$$\theta_v = \frac{V_a}{V_t} = \frac{\frac{M_h - M_s}{\rho_w}}{L * \pi * r^2}$$

Si se determina el contenido de humedad en los estratos de (20 - 40) y (40 - 60):

$$\theta_{v_{20-40}} = \frac{\frac{612 \text{ g} - 490 \text{ g}}{1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}}}{20 \text{ cm} * \pi * (2.5 \text{ cm})^2} = 0.3107$$

$$\theta_{v_{40-60}} = \frac{\frac{632 \text{ g} - 494 \text{ g}}{1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}}}{20 \text{ cm} * \pi * (2.5 \text{ cm})^2} = 0.3514$$

Reemplazando estos dos valores en la siguiente relación:

$$\theta_v = \left(\frac{R_s}{R_{std}} \right) * b - j \quad ; \text{ se obtienen 2 ecuaciones:}$$

$$0.3107 = \left(\frac{8,250}{10,000} \right) * b - j \quad \dots\dots\dots (p)$$

$$0.3514 = \left(\frac{9,250}{10,000} \right) * b - j \quad \dots\dots\dots (q)$$

Rpta:

**Resolviendo las ecuaciones anteriores, se obtiene:
b = 0.407 y j = 0.025**

2.1.4 Variación del contenido de humedad

La variación o descenso del contenido de humedad de un suelo sin problemas de drenaje se ajusta a un modelo exponencial de la forma:

$$\theta = a * t^b \quad \dots\dots\dots (38)$$

Donde:

a = Contenido de humedad que tiene el suelo un día después del riego

b = Exponente de la función y su magnitud varía entre 0 y -1

t = Número de días transcurridos desde el último riego

θ = Contenido de humedad del suelo (vol % ó masa %)

La representación de la variación del contenido de humedad de una muestra de suelo se observa en la figura N° 3.

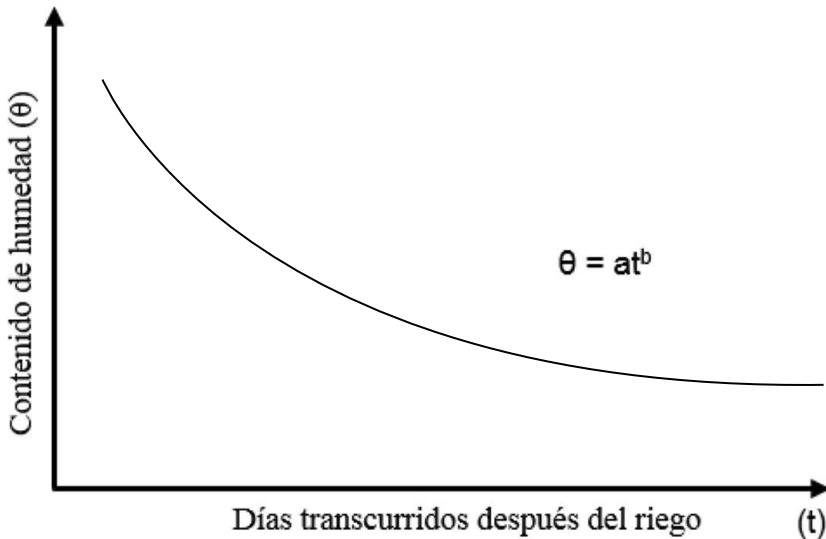


Figura N°3.- Variación del contenido de humedad

El cálculo de los parámetros de la ecuación (38) se puede efectuar mediante el método gráfico o el método analítico, llamado también método de los mínimos cuadrados.

a) Método analítico

Este método se basa en los mínimos cuadrados, y es más preciso que el método gráfico. El principio de este método consiste en determinar los parámetros que miden el grado de asociación entre las variables del contenido de humedad (vol %) y el número de días transcurridos desde el último riego.

Problema N°1

Determinar la expresión matemática y el coeficiente de determinación (r^2) de la curva de descenso del contenido de humedad del suelo, si la información básica se muestra en las columnas (1) y (2) del cuadrado siguiente:

CAMPO: Santa Rosa

CULTIVO: Maíz

Contenido De humedad (θ) (vol, %)	Nº días Después de Último riego (t)	$Y = \log \theta$	$X = \log t$	$X * Y$	X^2	Y^2
32.20	1.0	1.5079	0.0	0.0	0.0	2.2736
28.80	3.0	1.4594	0.4771	0.6963	0.2276	2.1298
26.80	6.0	-	-	-	-	-
25.40	9.0	-	-	-	-	-
23.84	13.0	-	-	-	-	-
22.20	16.0	-	-	-	-	-
21.00	18.0	-	-	-	-	-
19.00	25.0	-	-	-	-	-
17.50	34.0	-	-	-	-	-
16.60	38.0	-	-	-	-	-
15.60	45.0	-	-	-	-	-
15.00	49.0	-	-	-	-	-
Σ		15.9572	13.6355	17.5424	18.3955	21.3502

Solución:

Llenando previamente el cuadro anterior y sumando, se obtienen los totales.

Linearizando, es decir aplicando el logaritmo a la ecuación 38, se obtiene:

$$\theta = a * t^b$$

$$\log \theta = \log a + b * \log t$$

que también puede ser escrito de la forma: $Y = N + b * X$

que corresponde a un modelo lineal típico, donde:

$$\log \theta = \log a + b * \log t$$

$$Y = N + b * X$$

$$Y = \log \theta$$

$$N = \log a$$

$$X = \log t$$

Luego, aplicando la técnica de los mínimos cuadrados, se tiene que:

$$\boxed{b = \frac{n \sum X_i Y_i - \sum X_i \sum Y_i}{n \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2}} \dots\dots\dots (39)$$

$$\boxed{N = \frac{\sum Y_i}{n} - b \frac{\sum X_i}{n} = \bar{Y} - b\bar{X}} \dots\dots\dots (40)$$

Donde:

n = Es el número de datos usados en el análisis.

Calculando “b” utilizando la ecuación 39:

$$b = \frac{n \sum X_i Y_i - \sum X_i \sum Y_i}{n \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2}$$

$$b = \frac{12 * (17.5424) - (13.6355) * (15.9572)}{12 * (18.3954) - (13.6355)^2}$$

$$\therefore \boxed{b = -0.203}$$

Calculando “N” utilizando la ecuación 40:

$$N = \frac{\sum Y_i}{n} - b \frac{\sum X_i}{n} = \bar{Y} - b\bar{X}$$

$$N = \frac{15.9572}{12} - (-0.203) * \frac{13.6355}{12}$$

$$\therefore \boxed{N = 1.5604}$$

Calculando “a”:

$$N = \log a$$

$$\log a = N$$

$$a = \text{antilog}(N)$$

$$a = \text{antilog}(1.5604) = 36.36$$

$$a = 36.36$$

Obteniendo, finalmente, que la ecuación buscada es:

$$\theta = a * t^b$$

$$\text{Rpta: } \theta = 36.36 * t^{-0.203}$$

El coeficiente de determinación (r^2) se determina mediante la relación:

$$r^2 = \frac{\left(\sum X_i Y_i - \frac{\sum X_i \sum Y_i}{n}\right)^2}{\left(\sum X_i^2 - \frac{(\sum X_i)^2}{n}\right) * \left(\sum Y_i^2 - \frac{(\sum Y_i)^2}{n}\right)} \dots\dots\dots (41)$$

Reemplazando valores, se obtiene:

$$r^2 = \frac{\left(17.5424 - \frac{(13.6355) * (15.9572)}{12}\right)^2}{\left(18.3954 - \frac{(13.6355)^2}{12}\right) * \left(21.3502 - \frac{(15.9572)^2}{12}\right)} = 0.916$$

$$\text{Rpta: } r^2 = 0.916$$

b) Método gráfico (papel doble logaritmo)

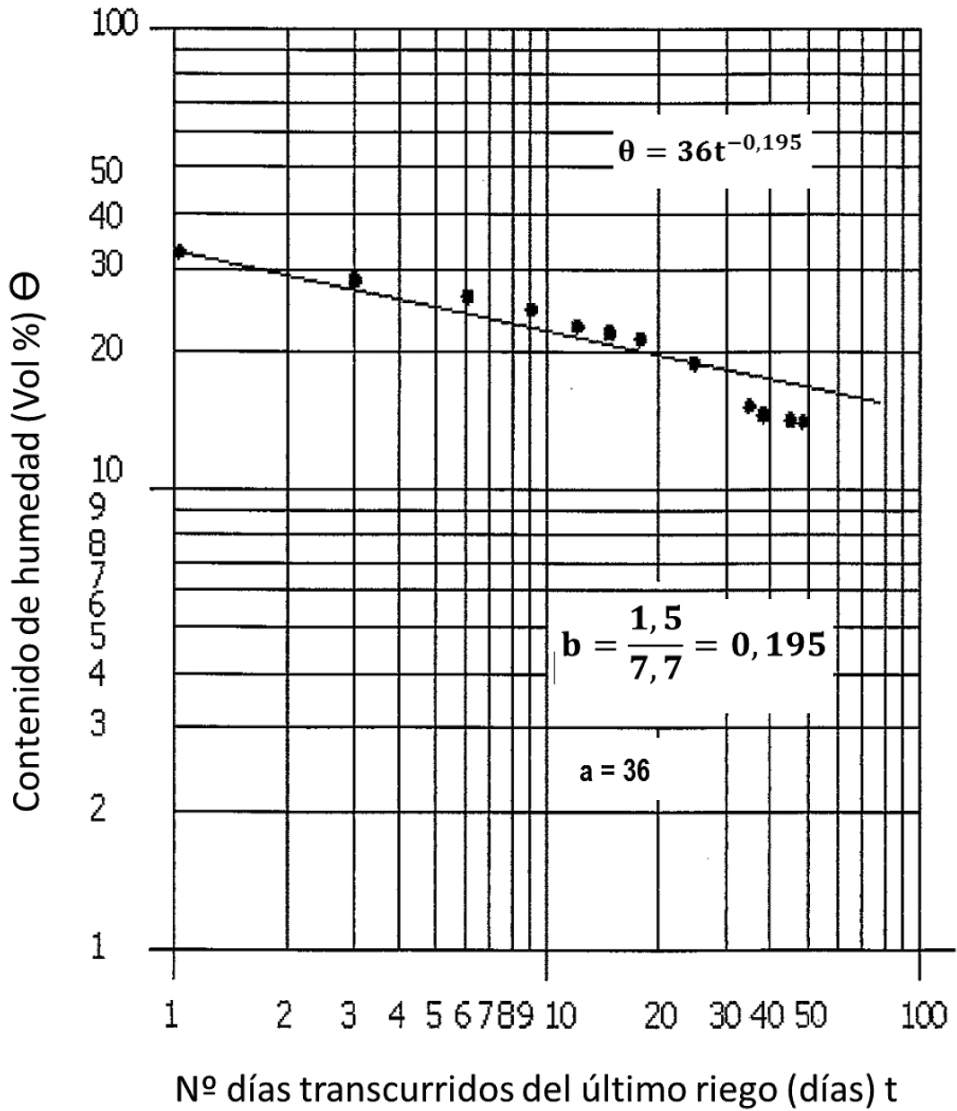


Figura N°4. Determinación de la ecuación de descenso del contenido de humedad

2.2 El agua en el suelo y el mecanismo de retención

El suelo es un sistema o cuerpo poroso que está formado por elementos o partículas sólidas de diferentes diámetros, tamaños y diferente composición química, que tienen o forman espacios porosos entre ellas y que se encuentran ocupados ya sea por aire, agua o por ambos elementos. La porosidad total del suelo (% del volumen de poros en relación al volumen total del suelo) varía normalmente entre 35% y 60%. Corresponde entre 35% y 45% para los suelos arenosos, entre 45% y 55% para los suelos de textura media o suelos francos y entre 55% y 60% para los suelos de textura fina o suelos arcillosos o pesados.

Todo suelo tiene cargas positivas y negativas, según los elementos que contenga. La fuerza de atracción de la superficie de las partículas secas del suelo por las moléculas polares de agua se denomina fuerza de adhesión. Al fenómeno de adsorción del agua como una película formada por varias moléculas de agua sobre la superficie de las partículas sólidas se le denomina agua de adhesión. Ésta produce una reducción en el movimiento de las moléculas de agua, una reducción en la energía del agua y una liberación de calor que ocasiona un nivel más bajo de energía del agua.

Es de remarcar que el agua de adhesión no está disponible para las plantas. Es considerada como el agua higroscópica, y se remueve solamente secando el suelo a la estufa. Más allá del espacio de atracción de agua por parte de las partículas sólidas del suelo, las moléculas de agua se atraen entre sí, formando una película líquida continua alrededor de las partículas sólidas y en los microporos debido a la tensión superficial. A este tipo de agua, se le llama agua de cohesión. De ésta, aproximadamente dos tercios externos de su película es considerada como el agua disponible para las plantas, y es conocida también como el agua capilar.

El agua existente en los macroporos del suelo tiene mucha más energía que el agua de cohesión, por lo tanto es retenida más levemente, y se puede mover con facilidad fuera del suelo por efecto de la gravedad. Por este motivo, se le denomina agua gravitacional.

Cuando un suelo ha recibido un aporte abundante de agua, ya sea proveniente de lluvia o riego, el agua recibida se infiltrará y se distribuirá en la masa de suelo. Parte del agua es utilizada en la evapotranspiración, y el resto percola a mayor profundidad.

Conocer la cantidad de agua que hay en el suelo, sin saber sus otras características, es de poca utilidad en problemas de relación agua-suelo-planta. Por ejemplo, si se dice que el contenido de humedad volumétrica de un suelo es de 16 vol%, este dato serviría poco si se quiere saber cuán disponible está el agua para la planta en esta situación. En efecto, si se tratase de un suelo arenoso, este nivel de humedad correspondería a una humedad cercana a la capacidad de campo; mientras que para un suelo arcilloso, este nivel de humedad corresponderá a un punto cercano al punto de marchitez permanente. De lo explicado anteriormente, se puede afirmar que es necesario definir el nivel de humedad del perfil enraizado en forma ‘‘cualitativa’’ y ‘‘cuantitativa’’; es decir, en términos del grado de disponibilidad del agua para la planta y de su cantidad existente.

El agua es retenida por el suelo a través de los poros existentes, pues a medida que el suelo se va secando, ya sea debido a las pérdidas por percolación, drenaje, evaporación o por la misma evapotranspiración de la planta, ésta absorbe el agua del suelo a través de su sistema radicular. El agua es extraída con mayor facilidad de los poros más grandes y de allí se va dificultando la extracción de agua de los poros cada vez más pequeños, debido a que en ellos está el agua más fuertemente retenida.

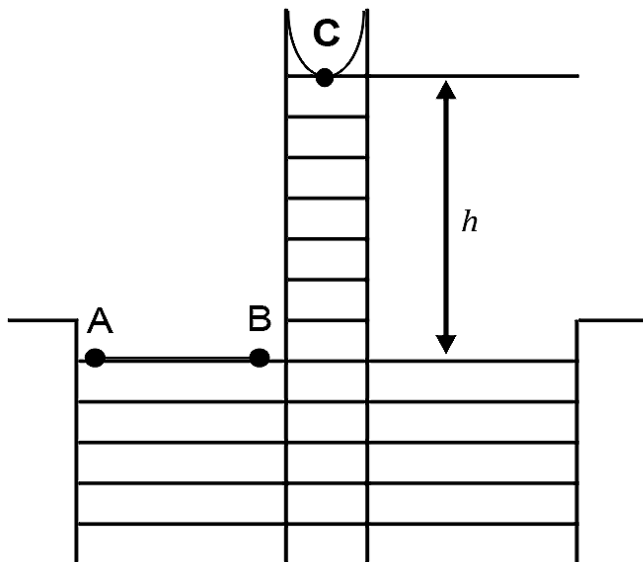
Dentro del rango del nivel de humedad del suelo en que las plantas absorben agua, ésta es retenida por el suelo, debido principalmente a dos mecanismos físicos:

- La tensión superficial del agua en contacto con el aire y el ángulo de contacto entre el agua y las partículas del suelo mismo; y
- La fuerza de repulsión entre las partículas de arcilla.

La tensión superficial en los líquidos es la responsable de oponerse al agrandamiento de su superficie cuando entra en contacto con otra fase. Por la fuerza de tensión superficial, el agua asciende como en un tubo capilar;

debido a su vez a la atracción que se genera entre la pared del capilar y el agua, como mecanismo de resistencia al agrandamiento de la superficie del agua en contacto con el aire.

Para explicar mejor el fenómeno, se muestra la figura siguiente donde se observa cómo el agua asciende en un tubo capilar hasta una posición determinada:



La presión en los puntos A y B es igual a la presión atmosférica. La presión en el punto C es menor que en el punto B.

Cuando el agua deja de subir por el capilar, tal como se muestra en la figura, se puede decir que ya alcanzó la condición de equilibrio. Aquí, se presentan dos fuerzas iguales y de sentido contrario, una fuerza (F_o) que actúa hacia abajo, que representa el peso de la columna de agua, cuya magnitud está definida por la relación:

$$F_o = h * r^2 * \pi * \rho_w \dots\dots\dots (42)$$

Donde:

h = Altura de la ascensión capilar (cm),

r = Radio interno del tubo capilar (cm),

ρ_w = Peso específico del agua (1 g/cm^3), y

$\pi = 3.1416$, constante.

La otra fuerza (F_1) que actúa hacia arriba y cuya magnitud es igual a F_o . La magnitud de la fuerza F_1 está determinada mediante la relación:

$$F_1 = \pi * 2r * T * \cos\theta \quad \dots\dots\dots (43)$$

Donde:

r = Radio interno del tubo capilar (cm),

T = Tensión superficial del agua en contacto con el aire (gr/cm), y

θ = Ángulo de contacto entre las paredes del tubo y el agua. El ángulo de contacto agua-vidrio es 0° .

Como F_o y F_1 son iguales en magnitud y opuestas en sentido, luego se tiene que:

$$h * r^2 * \pi * \rho_w = \pi * 2r * T * \cos\theta \quad \dots\dots\dots (44)$$

Además, como $\theta = 0^\circ$, para el caso agua - vidrio, luego la altura de ascensión capilar será igual a:

$$h = \frac{2T}{r * \rho_w} \quad \dots\dots\dots (45)$$

Para temperaturas del agua que varían entre 18°C hasta 20°C , el valor de la tensión superficial (T) es de 0.075 gr/cm .

La tensión o presión negativa del agua en el punto C o fuerza hacia abajo (P_c) depende del radio del tubo capilar y de la tensión superficial del agua (T), luego se tiene que:

$$P_c = h * \rho_w$$

$$P_c = \frac{2T}{r * \rho_w} * \rho_w$$

Como $T = 0.075 \text{ g/cm}$, reemplazando este valor en la ecuación, se tiene:

$$P_c = \frac{2T}{r}$$

$$P_c = \frac{2 * 0.075}{r}$$

$$\boxed{P_c = \frac{0.15}{r}} \dots\dots\dots (46)$$

Cuando un suelo arcilloso es humedecido, el agua es adsorbida en torno y entre las partículas, produciéndose la formación de una capa de agua alrededor de las partículas de arcilla. Esto trae como consecuencia una expansión o hinchamiento del suelo, que es debido a la repulsión entre las partículas de arcilla. Este proceso es conocido también como hinchamiento osmótico, y se manifiesta tangiblemente como el hinchamiento del suelo.

Para extraer agua de un suelo en estas condiciones, es necesario desarrollar una fuerza de “succión” a fin de poder contrarrestar la fuerza de repulsión existente entre las partículas del suelo. La extracción de agua de un suelo pesado y expandido no permite la entrada de aire; pues al extraerse agua del suelo, las partículas de arcilla convergen, todo lo cual hace que la porosidad del suelo disminuya durante el proceso de secado. Cuando las partículas del suelo estén prácticamente imposibilitadas de acercarse, ingresará aire. Este mecanismo de retención de agua que funciona en suelos arcillosos o

pesados y a contenidos elevados de humedad del suelo tiene un significado gravitante en la producción agrícola.

La tensión del agua en los distintos puntos del perfil del suelo varía, según se trate de suelos permeables, profundos y con la napa freática a gran profundidad o se trate de suelos con la napa freática superficial y bastante estratificada.

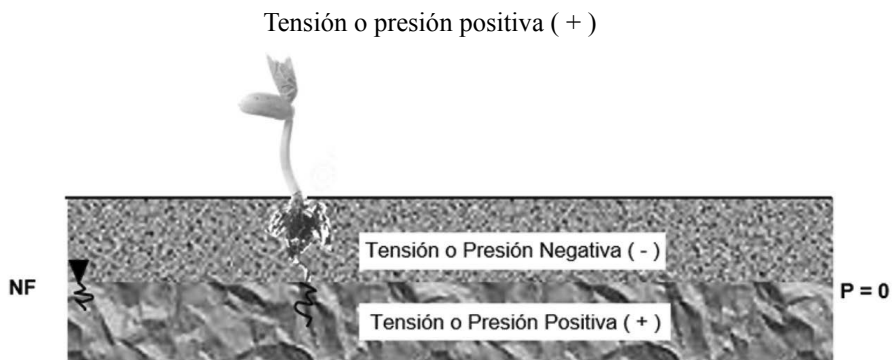
Cuando el nivel freático es profundo, para un punto determinado del suelo, se producirá una variación importante en la tensión de humedad entre riego y riego. Asimismo, se presenta una variación importante en la tensión de humedad entre la superficie del suelo y los niveles inferiores de éste. En la superficie del suelo, los niveles de tensión van creciendo rápidamente a medida que se va secando el suelo debido básicamente a la evaporación. Se puede llegar a tener tensiones hasta de 15 a 20 bares o mayores; mientras que en las capas inferiores del perfil de suelo, es decir en las zonas donde se encuentran las raíces, los estados energéticos o potencial del agua, son mucho menores; pues aquí las pérdidas de agua se producen, fundamentalmente, debido a la absorción de agua por las raíces. Además, en las zonas más cercanas a las raíces, la tensión es mayor que en las zonas más alejadas, debido a que el fenómeno de absorción de agua por las raíces se efectúa desde las zonas más cercanas. Todas estas situaciones son dinámicas, y varían entre riego y riego.

Cuando el nivel freático es superficial, el agua del suelo que se encuentra encima de la napa freática está sometida a tensiones o presiones negativas (menores que la presión atmosférica) y bajo el nivel freático, las presiones serán positivas; siendo la presión igual a cero en la posición misma del nivel freático.

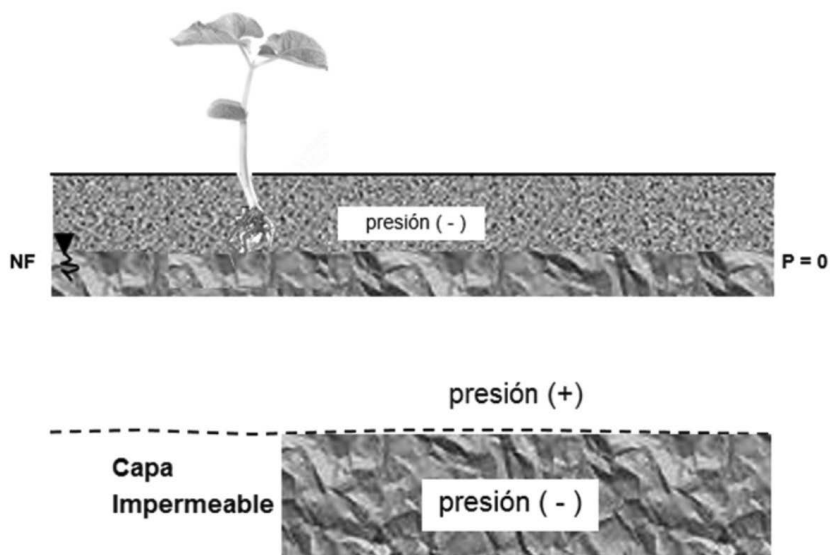
Normalmente, en el campo, cuando se tienen capas impermeables en el perfil del suelo se pueden formar niveles freáticos temporales, debido a que se acumula agua temporalmente sobre la capa impermeable. Se genera, así, presiones negativas por encima de estas zonas, presiones positivas dentro de esta capa freática transitoria y presiones negativas dentro de la capa impermeable hacia abajo.

En las figuras siguientes, se explican estos fenómenos físicos:

a. Perfil de suelo uniforme y profundo y con una napa freática alta



b. Perfil de suelo con capa impermeable, con una napa freática transitoria después del riego



Problema N°1

Calcular la presión capilar del agua en el suelo, expresada en altura de agua, siendo el diámetro efectivo del tubo $d = 0.85 \cdot 10^{-3}$ cm.

Datos:

$$d = 0.85 \cdot 10^{-3} \text{ cm}$$

$$\text{radio} = \frac{\text{diámetro}}{2}$$

$$r = \frac{0.85 \times 10^{-3} \text{ cm}}{2}$$

$$r = 0.425 \cdot 10^{-3} \text{ cm}$$

Solución:

Datos:

Aplicando la ecuación N°31 y reemplazando valores, se obtiene:

$$P_c = \frac{0.15}{r}$$

$$P_c = \frac{0.15}{0.425 \cdot 10^{-3}}$$

$$P_c = 352.9 \text{ cm}$$

Rpta:

La presión capilar el agua en el suelo expresada en altura de agua es de 352.9 cm.

2.2.1 Concepto energético en la retención del agua en el suelo

El contenido de humedad de un suelo es análogo al contenido de calor de un cuerpo, mientras que el potencial es análogo a la temperatura. Como ya se ha mencionado anteriormente, conocer el contenido de humedad del suelo no es suficiente para poder explicar a cabalidad el estado o grado de disponibilidad del agua en el suelo en relación a la planta. Por lo tanto, es necesario definir una propiedad o característica asociada con la cantidad de agua del suelo que permita explicar las siguientes observaciones:

- Suelos que pueden tener igual contenido de humedad, pero que tienen diferentes texturas y que al ponerse en contacto entre ellos, va a presentarse un flujo de agua de un suelo a otro. En forma general, va a fluir el agua desde el suelo de textura gruesa hacia el de textura fina.
- Las plantas crecen a menudo de manera distinta en suelos con textura diferente, a pesar de que puedan tener las mismas cantidades de agua y los otros elementos de producción en forma similar.
- Suelos que pueden ser tratados de manera similar en la aplicación de agua, pero que tienen texturas diferentes; y luego, consecuentemente, tendrán también contenidos de humedad distintos.

Una de las propiedades que ayuda a explicar las observaciones anteriores es el potencial o estado energético del agua en el suelo. El potencial del agua se define como la cantidad de trabajo que una cantidad unitaria de agua en un sistema agua-suelo en equilibrio es capaz de realizar cuando se mueve hasta el agua en el estado de referencia y a la misma temperatura. Por lo general, se elige como estado de referencia el agua pura. Además, se debe tener presente que el movimiento del agua al estado de referencia se produce a través de una membrana semipermeable; entonces el potencial del agua en el suelo es sinónimo físicamente a la presión.

El potencial del agua en el suelo expresa el grado de retención del agua por el suelo, y cuya magnitud es siempre negativa (expresa succión); y está determinada, en gran medida, por las fuerzas que enlazan al agua

con los elementos de la fase sólida del suelo. Estas fuerzas se manifiestan principalmente en una retención del agua por el suelo (pues el suelo succiona agua) que depende del nivel de humedad del suelo. Las relaciones entre el contenido de humedad, su estado energético y los procesos de gradientes energéticos en el sistema agua-suelo-plantas, son de fundamental importancia para el riego y para el logro de los niveles de maximización de la producción que se busque obtener.

Cuando una fuerza de succión actúa en el suelo, extrae agua de éste, disminuyendo consecuentemente su contenido de humedad. Es decir, existe una relación inversa entre la tensión del agua en el suelo o estado energético o potencial del agua en el suelo y la cantidad de agua existente en éste (a mayor tensión o estado energético del agua en el suelo, menor será la cantidad de agua en el suelo). Por el contrario, si la humedad del suelo está en equilibrio, la resultante de las fuerzas antes mencionadas equivalen a cero.

La relación existente entre el contenido de humedad del suelo y sus correspondientes estados energéticos se representan en una curva que se llama curva de retención o curva pF.

Los principales componentes del potencial o tensión del agua en el suelo son: El potencial de presión (Ψ_p), el potencial mátrico (Ψ_m) y el potencial osmótico (Ψ_o). Para determinar el potencial total del agua, se considera además de los anteriores, el potencial gravitacional (Ψ_z). La relación que se puede establecer, en consecuencia, es:

$$\Psi_t = \Psi_p + \Psi_m + \Psi_o + \Psi_z \quad \dots\dots\dots (47)$$

Todos estos potenciales se definen en relación a la cantidad unitaria de agua. El potencial se puede expresar en las siguientes unidades:

- Si la cantidad de agua se expresa como masa, las unidades del potencial son: ergios/gramo.
- Si las cantidades de agua se expresan como un volumen, las unidades de potencial son: dinas/cm².

- Si la cantidad de agua se expresa como peso, las unidades de potencial son: cm de altura de agua o columna de agua.

La conversión de una unidad a otra se efectúa mediante el uso de factores de conversión. A continuación, se presenta una serie de equivalencias.

La presión se mide en unidades de Fuerza/Área y el Potencial se mide en unidades de trabajo/masa:

		1,020 cm de agua
		75.01 cm de altura de mercurio
		0.9869 atm
1 Bar	=	100 cb = 1000 mb
		$1,000 \frac{\text{Joules}}{\text{kg}}$
		$14.50 \frac{\text{lb}}{\text{pulg}^2}$
		$10^6 \frac{\text{ergios}}{\text{g}}$
		$10^6 \frac{\text{dinas}}{\text{cm}^2}$
1 atm	=	$1.013 \cdot 10^6 \frac{\text{erg}}{\text{g}}$
		$101.3 \frac{\text{Julio}}{\text{kg}}$
		$1.013 \frac{\text{erg}}{\text{cm}^3} = 0.1013 \frac{\text{Kgm}}{\text{cm}^3}$
1 Mega Pascal (MPa)	=	10^6 Pascal
		9.86923 atm
		10 bares

Fuente: Elaboración propia

pF = 3, indica una carga de agua de 1,000 cm; pF = 1, indica una carga de agua de 10 cm. Todo esto significa que el valor de pF es igual al logaritmo de la carga de la presión negativa expresada en cm de agua, es decir:

$$\boxed{pF = \log \Psi} \quad \dots\dots\dots (48)$$

Donde:

Ψ : potencial del agua en el suelo medido en cm de altura de columna de agua.

Cabe mencionar que la fuerza con que el agua es retenida en cada poro es función de su diámetro. Los poros pequeños retienen el agua con más fuerza que los poros grandes. Entre el valor pF y el diámetro de los poros, expresado en cm, existe la siguiente relación:

$$\boxed{pF = \log \frac{0.30}{d}} \quad \dots\dots\dots (49)$$

Donde:

pF : Logaritmo de la columna o altura de la columna de agua o estado energético del agua en el suelo.

d : Diámetro de los poros en cm.

Por otro lado, se puede decir que en forma práctica:

1 atmósfera $\approx$ 1 bar $\approx$ 100 centibares $\approx$ 1,000 milibares = 10 m de columna de agua

La columna de presión negativa es igual a la presión negativa (tensión) dividida entre el peso específico del líquido. Las unidades que más se usan para expresarlas son: **m de altura de agua, cm de altura de agua, mm de altura de mercurio (Hg) o en valores de pF**. La relación existente entre ellas es la siguiente:

1 atm = 10 m (1,000 cm) de altura de agua ($pF = 3$) = 738 mm de altura de Hg.

Todas las unidades mencionadas anteriormente pueden transformarse de unas a otras mediante los factores de equivalencia correspondiente.

2.2.2 La curva de retención

Es llamada, también, curva característica de humedad, curva de retención de humedad o curva pF del suelo. Ésta representa la relación existente entre el contenido de humedad del suelo y su correspondiente estado energético o potencial con que el agua está retenida en el suelo. El potencial indica la energía o el trabajo que debe gastarse para extraer una unidad de agua del suelo a ese correspondiente nivel de humedad. El potencial total del agua en el suelo o la tensión de agua es una presión negativa que se relaciona con la presión atmosférica. La curva de retención tiene dos límites bien definidos:

- **El límite húmedo** que está determinado por el nivel freático. En esta condición, todos los poros se encuentran llenos de agua; y el potencial del agua estará definido, básicamente, por el potencial osmótico; ya que los otros potenciales son iguales a cero.
- **El límite seco** que está definido por el punto correspondiente de tierra seca; es decir, por el nivel de humedad correspondiente a un estado energético de 10^4 bars.

La curva de retención de agua de un suelo está influenciada por características texturales, estructurales y químicas del sistema suelo así como por la temperatura del agua del suelo. Para una tensión o potencial dado, el contenido de humedad disminuye a medida que la temperatura del suelo aumenta. En la figura N° 6, se muestran 3 curvas de retención para tres suelos característicos: arenoso, franco y arcilloso.

- Desde el punto de vista del riego de los cultivos interesa 2 puntos claves: **La capacidad de campo** y el **punto de marchitez permanente**. **La capacidad de campo** corresponde a un estado energético del agua en el suelo entre 0.1 y 0.3 bars, dependiendo del tipo de suelo y cultivo; mientras que **el punto de marchitez permanente** corresponde a un estado energético entre **15 a 16 bars** dependiendo del tipo de suelo y cultivo; estas cifras representan a valores negativos, pues expresan el nivel de succión o retención del agua por el suelo, pero que por fines prácticos, normalmente se expresan como si se tratasen de cifras positivas.

- El rango de humedad disponible entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente constituye lo que se llama: humedad aprovechada total del agua en el suelo.

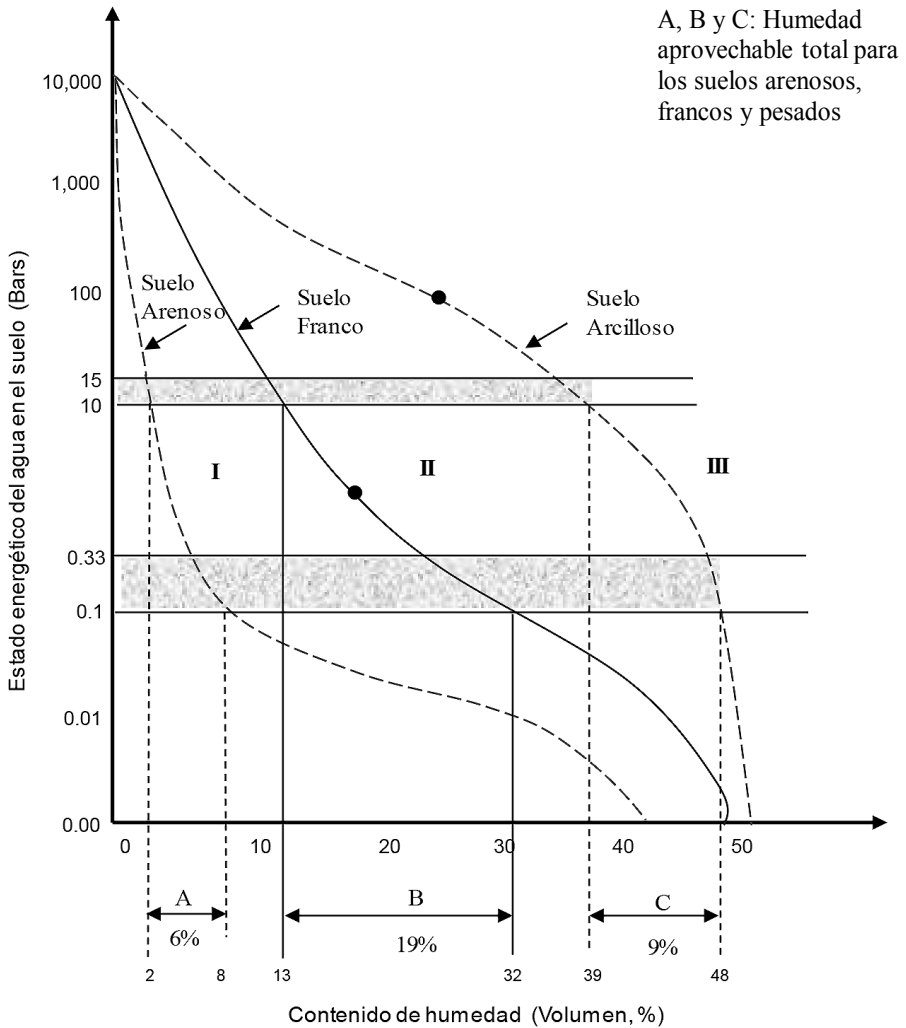


Figura N°6.- Curva pF o curva de retención de tres suelos característicos: arenoso (I), franco (II) y arcilloso (III)

En el siguiente cuadro, se mencionan los períodos sensibles a los déficits de humedad de algunos cultivos.

Períodos sensibles al déficit de agua en algunos cultivos

- **Alfalfa:** Inmediatamente después del corte (y para la producción de semillas, en la floración).
- **Plátano:** En todo tiempo, pero particularmente durante la primera parte del período vegetativo, la floración y la formación del fruto.
- **Frijol:** Floración y llenado de las vainas; el período vegetativo no es sensible cuando está seguido de un suministro abundante de agua.
- **Col:** Durante el desarrollo de las cabezas y su maduración.
- **Toronja:** Floración y fructificación > que el desarrollo del fruto.
- **Limón:** Floración y fructificación > que el desarrollo del fruto, puede inducirse una fuerte floración mediante el retiro del riego cerca de la floración.
- **Naranja:** Floración y fructificación > que el desarrollo del fruto.
- **Algodón:** Floración y formación de las cápsulas.
- **Vid:** Período vegetativo, especialmente durante el alargamiento de los brotes y la floración.
- **Maíz:** Floración > que la formación del grano; la floración es muy sensible si no hubo un déficit anterior de agua.
- **Cebolla:** Desarrollo del bulbo, especialmente durante el crecimiento rápido del bulbo > que el período vegetativo y para la producción de semilla, en la floración.
- **Pimentero:** Durante todo el tiempo, pero en especial inmediatamente antes y en el comienzo de la floración.
- **Piña:** Durante el período de crecimiento vegetativo.
- **Patata:** Período de estolonización e iniciación del tubérculo, formación del rendimiento > que el período vegetativo inicial y maduración.
- **Arroz:** Durante el periodo de desarrollo de las espigas y en la floración > que el período vegetativo y la maduración.
- **Sorgo:** Floración.

Problema N°1

Se ha medido en el suelo un nivel de humedad equivalente a una succión de 1,850 cm de altura de agua.

Calcular los valores en:

- a) pF
- b) atm
- c) bares
- d) erg/gr

Solución:**Datos:**

Succión de 1,850 cm.

Aplicando la relación: $pF = \log \Psi$ y reemplazando valores, se obtiene:

$$1 \text{ atm} = 1.013 \text{ bares} = 101.3 \frac{\text{Julios}}{\text{Kg}} = 101.3 * 10^4 \frac{\text{ergi}}{\text{g}} = 101.3 * 10^4 \frac{\text{dinas}}{\text{cm}^2} = 1,033 \text{ cm}$$

$$\text{a) } pF = \log 1,850 = 3.267 \quad \Rightarrow \quad \boxed{pF = 3.267} \quad \text{Rpta.}$$

Solución para b), c) y d). Si se cumple la relación:

Luego:

$$\text{b) } 1,850 \text{ cm} * \left(\frac{1 \text{ atm}}{1,033 \text{ cm}} \right) = \boxed{1.79 \text{ atm}} \quad \text{Rpta.}$$

$$\text{c) } 1,850 \text{ cm} * \left(\frac{1.013 \text{ bares}}{1,033 \text{ cm}} \right) = \boxed{1.81 \text{ bars}} \quad \text{Rpta.}$$

$$\text{d) } 1,850 \text{ cm} * \left(\frac{101.3 * 10^4 \frac{\text{ergios}}{\text{g}}}{1,033 \text{ cm}} \right) = \boxed{181.4 * 10^4 \frac{\text{ergios}}{\text{g}}} \quad \text{Rpta.}$$

2.2.3 Potencial total del agua en el suelo (Ψ_t)

Los principales componentes del potencial o tensión total del agua en el suelo son: el potencial mátrico (Ψ_m), el potencial osmótico o de soluto (Ψ_o), el potencial de presión (Ψ_p) y el potencial gravitacional (Ψ_z), luego:

$$\boxed{\Psi_t = \Psi_p + \Psi_m + \Psi_o + \Psi_z} \dots\dots\dots(50)$$

• Potencial mátrico (Ψ_m)

El potencial mátrico, llamado también potencial capilar, es una propiedad dinámica del suelo; y está determinado por la presencia de las partículas sólidas del suelo. Su efecto se manifiesta como una succión (presión negativa), por ello se le conoce como succión matriz. Este potencial es la resultante de las fuerzas capilares y de adsorción, debidas a la matriz sólida del suelo, (fuerzas de adhesión, cohesión y gravedad), así como al potencial osmótico de la doble capa difusa. En suelos saturados, el potencial mátrico es teóricamente igual a cero ($\Psi_m = 0$), pero es diferente de cero en un suelo no saturado. El Ψ_m es siempre un valor negativo, y representa el componente de la atracción del agua por las fuerzas de adsorción y capilaridad. Para capacidad de campo, tiene un valor Ψ_m entre 0.1 a 0.3 bares (-100 a - 300 cm de columnas de agua); para condiciones de punto de marchitez permanente, 15 bares (-15,000 cm de columna de agua).

La capilaridad es el resultado de la tensión superficial del agua y su ángulo de contacto con las partículas sólidas. En un sistema de suelo no saturado, se forman meniscos curvos que obedecen a la teoría de capilaridad.

Si el suelo fuera como un simple conjunto de tubos capilares, las ecuaciones de capilaridad serían suficientes para describir la relación de este potencial con los radios de los poros del suelo. Sin embargo, además de este fenómeno de capilaridad, el suelo exhibe fenómenos de

adsorción que son los que permiten la formación de envolturas hidratadas sobre las partículas del suelo. Estos dos fenómenos de interacción entre el agua y las partículas del suelo se ilustran en la siguiente figura:

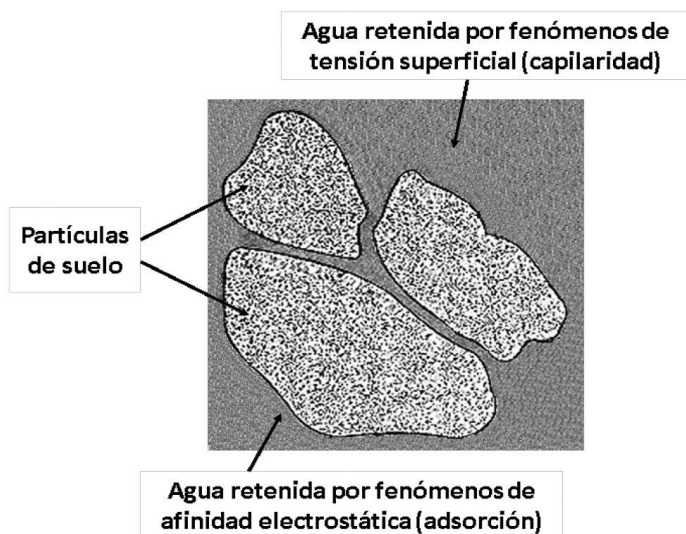


Figura N°7.- Fenómeno de interacción entre el agua y las partículas de suelo

El potencial mátrico tiene como componentes:

$$\Psi_m = \Psi_a + \Psi_c + \Psi_d \quad \dots\dots\dots(51)$$

Donde:

Ψ_a = Potencial de la fuerza de adhesión,

Ψ_c = Potencial de las fuerzas capilares, y

Ψ_d = Potencial osmótico de la doble capa difusa.

• Potencial osmótico o de soluto (Ψ_o)

Es el potencial determinado por la presencia de iones libres en el agua del suelo, provenientes de las sales no vinculadas de ninguna manera con la fase sólida del suelo. Se debe, fundamentalmente, a la hidratación de los cationes que resultan de la disolución de las sales que no saturan las cargas negativas de las partículas sólidas del suelo. El potencial osmótico es el trabajo requerido para separar el agua de estos iones.

Las fuerzas osmóticas tienen importancia en la absorción de agua por las raíces de las plantas. Este potencial representa la disminución de la capacidad de desplazamiento del agua debido a la presencia de solutos. Cuando se tiene una planta creciendo en un suelo con alto contenido de humedad, incluso cercano a capacidad de campo (Ψ_m -0.33 bar); la planta podría estar sufriendo de stress hídrico, si el suelo está altamente salinizado y cuyo potencial del agua en el suelo podría estar cercano al punto de marchitez permanente. A mayor cantidad de sales en el suelo, mayor es el valor de Ψ_o (más negativo) y consecuentemente hace más difícil que las raíces de las plantas extraigan el agua del suelo.

- **Potencial de Presión (Ψ_p)**

Es el potencial debido a la carga hidrostática, expresada como altura de la columna de agua sobreyacente. Este potencial es nulo a presión atmosférica.

Debajo del nivel freático, el potencial mátrico es nulo (cero), pero en su lugar aparece el potencial de sumersión o potencial de presión. Este potencial se aplica mayormente a suelos saturados. Se puede medir utilizando un piezómetro, y las unidades se dan en términos de altura de agua.

- **Potencial gravitacional (Ψ_z)**

Es el potencial debido a la posición o diferencia en elevación del punto de referencia en relación al punto considerado. Es decir, este potencial es independiente de las propiedades del suelo, pues depende sólo de la distancia vertical entre el punto de referencia y el punto considerado. Si el punto considerado está arriba del punto de referencia, Ψ_z es positivo; en caso contrario, es decir si el punto considerado está debajo del punto de referencia, Ψ_z es negativo.

Asociando este potencial gravitacional con el potencial total del agua en el suelo, se tendrá el potencial hídrico total Ψ_{ht} o simplemente potencial total (Ψ):

$$\Psi_{ht} = \Psi_t = \Psi_m + \Psi_o + \Psi_p + \Psi_z$$

El conocimiento del potencial hídrico total en diferentes puntos del sistema suelo-agua permite determinar la dirección en la cual fluirá el agua en el sistema.

La tensión o potencial total del agua en el suelo se define como la cantidad de trabajo que una cantidad unitaria de agua en un sistema agua-suelo, y que está en equilibrio es capaz de realizar cuando se mueve hasta el agua en el estado de referencia y a la misma temperatura. Normalmente, se toma como estado de referencia el agua pura.

La succión, la tensión de humedad del suelo, el stress de humedad o potencial total del agua en el suelo representan una presión negativa, y se expresan en algunas de las unidades siguientes: bar, centímetro de agua, centímetro de mercurio, atmósfera, centibares, milibares, joules/Kg, libras/pulg², ergios/gramo, dinas/cm² o pF. La más utilizada es el bar.

2.2.4 Fenómeno de histéresis y la capacidad de retención de un suelo

Dado que un suelo es un sistema complejo de elementos constitutivos, así como de poros de diferentes formas y tamaños; las curvas características de humedad ya sean de humedecimiento o secamiento son suaves y diferentes.

Por lo tanto, cada suelo tiene una curva de retención específica cuando su humedad decrece desde el punto de saturación, a esta curva se le denomina “curva de drenaje” o “curva de secamiento”. Si el mismo suelo ha estado inicialmente seco y luego se humedece lentamente, se puede observar que para los mismos potenciales fijados, las cantidades de agua serían diferentes que para el caso de secado; es decir, se tendrá una curva distinta que recibe el nombre de “curva de humedecimiento”.

Este efecto de variación entre la curva de secamiento y la curva de humedecimiento se designa con el nombre de “histéresis”. Significa que la tensión de la humedad del suelo no es una función de valor único de la humedad del suelo. Por lo tanto, las curvas de humedecimiento y de secamiento constituyen los rangos extremos de contenidos posibles de agua que puedan ser asociados con cualquier potencial matriz particular de dicho suelo. En la figura siguiente, se muestra el fenómeno de histéresis mostrando dos curvas de retención de agua.

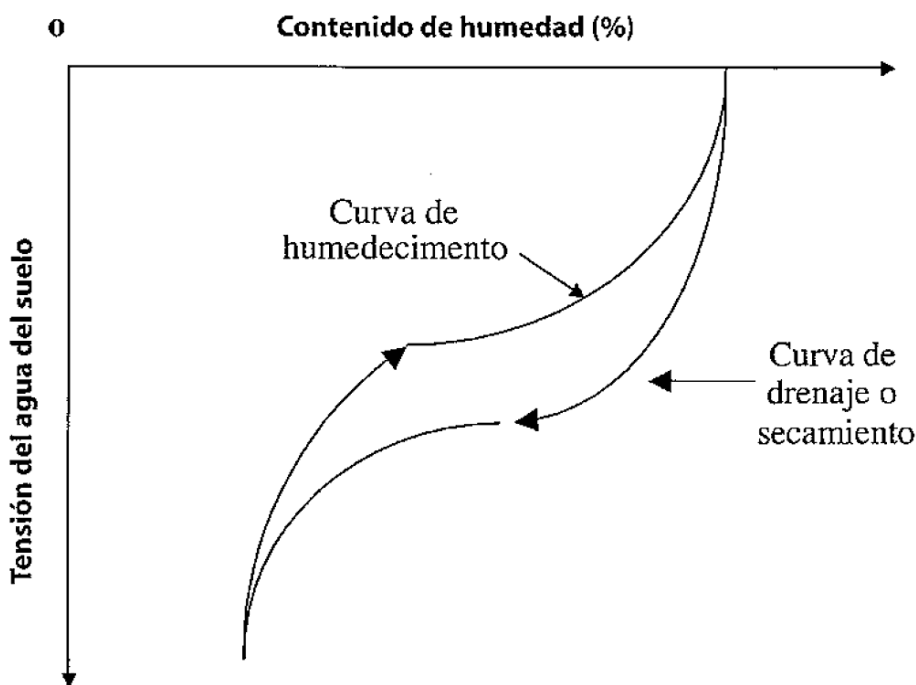


Figura N°8.- Fenómeno de histéresis en la curva de retención de agua de un suelo

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

Problema N°1

En un tensiómetro para medir el potencial mátrico, la distancia de la superficie libre del mercurio hasta la capa de cerámica del tensiómetro es de 20 cm. Si $Z_{\text{Hg}} = 13.9$ cm, determinar Ψ_m .

Solución:

Datos:

$$Z_o = 25 \text{ cm} ; Z_{\text{Hg}} = 13.9 \text{ cm}$$

Aplicando la relación para la figura mostrada

Donde:

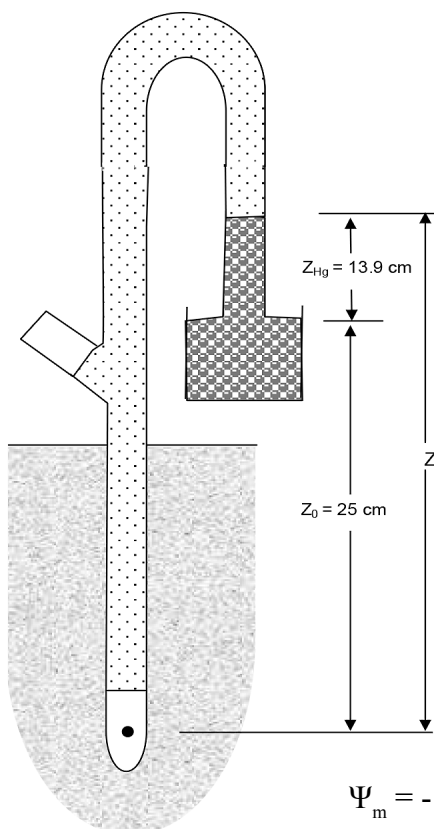
ρ_{Hg} = Densidad del mercurio (13.6 g/cm^3).

ρ_w = Densidad del agua (1.0 g/cm^3).

Ψ_m = Potencial mátrico.

Z_{Hg} = Distancia entre la parte posterior de la columna de mercurio a la superficie del mercurio en el reservorio.

Z = Distancia desde la parte superior de la columna de mercurio al centro de la cápsula de cerámica.



Reemplazando valores en la ecuación se tiene:

$$\Psi_m = -13.6 Z_{\text{Hg}} + Z$$

$$\Psi_m = -13.6 Z_{\text{Hg}} + (Z_{\text{Hg}} + Z_o)$$

$$\Psi_m = -12.6 Z_{\text{Hg}} + Z_o$$

Finalmente, el potencial mátrico será:

$$\Psi_m = -12.6 (13.9 \text{ cm}) + 25 \text{ cm}$$

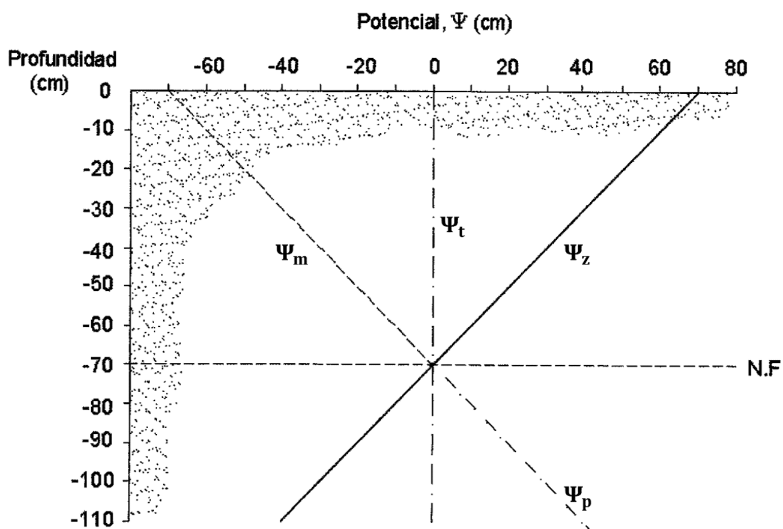
$$\Psi_m = -175.14 \text{ cm} + 25 \text{ cm}$$

$$\Psi_m = -150.14 \text{ cm} \Rightarrow \text{Rpta: } \boxed{\Psi_m = 150.14 \text{ cm}}$$

Problema N°2

Se tiene un suelo en el cual el agua se encuentra en equilibrio y el nivel freático (N.F.) o la tabla de agua está a -70 cm, del nivel del suelo. Encontrar los valores de Ψ_p , Ψ_m , Ψ_z y Ψ_t a través del perfil del suelo hasta -110 cm. Ver figura adjunta.

Solución:



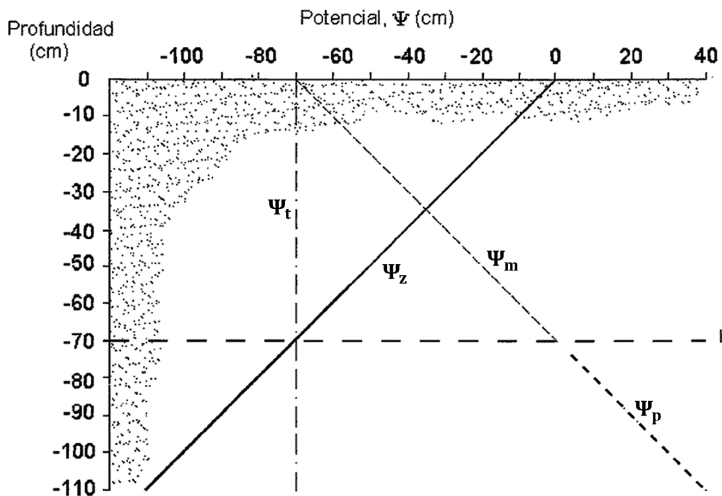
De la solución: $\Psi_t = \Psi_z + \Psi_m \pm \Psi_p$; se obtiene:

Profundidad del suelo cm	Ψ_p	Ψ_m	Ψ_z	Ψ_t
0	0	-70	70	0
10	0	-60	60	0
20	0	-50	50	0
30	0	-40	40	0
40	0	-30	30	0
50	0	-20	20	0
60	0	-10	10	0
70	0	0	0	0
80	10	0	-10	0
90	20	0	-20	0
100	30	0	-30	0
110	40	0	-40	0

Problema N°3

Para las mismas condiciones del problema anterior, fijar el nivel de referencia en la superficie del suelo. Encontrar los valores de Ψ_n , Ψ_p , Ψ_m y Ψ_t . Ver figura adjunta:

Solución:



De la solución: $\Psi_t = \Psi_z + \Psi_m \pm \Psi_p$; se obtiene:

Profundidad del suelo cm	Ψ_p	Ψ_m	Ψ_z	Ψ_t
0	0	-70	0	-70
10	0	-60	-10	-70
20	0	-50	-20	-70
30	0	-40	-30	-70
40	0	-30	-40	-70
50	0	-20	-50	-70
60	0	-10	-60	-70
70	0	0	-70	-70
80	10	0	-80	-70
90	20	0	-90	-70
100	30	0	-100	-70
110	40	0	-110	-70

2.3 Movimiento del agua en el suelo

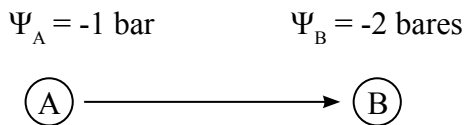
Desde el punto de vista de riego de los cultivos y del drenaje, la porción del suelo y de interés a ser analizada es la zona radicular. En tal sentido, el proceso de entrada de agua al suelo –a la zona de raíces– ya sea proveniente de la lluvia, el riego o ascensión capilar, así como el proceso de salida ya sea mediante la transpiración, evaporación o percolación constituyen los casos de importancia del movimiento del agua en el suelo. En condiciones normales, para la mayoría de los cultivos, el perfil del suelo de la zona de raíces corresponde al estrato no saturado; y en él se presentan los siguientes procesos o fenómenos relacionados con el movimiento del agua en los suelos no saturados:

- Infiltración;
- Percolación del agua por debajo de la zona de raíces;
- Redistribución del agua en el suelo, durante y después del proceso de infiltración;
- Movimiento del agua en el suelo hacia las raíces;
- Ascensión capilar del agua desde el nivel freático; y
- Evaporación del agua desde la superficie del suelo.

Todos estos casos de movimiento del agua en el suelo no ocurren simultáneamente. Así, la percolación se produce cuando a la zona de raíces se le agrega una mayor cantidad de agua que la capacidad de retención del suelo, y se prolonga hasta que se establezcan unas condiciones de “equilibrio” en el suelo. En forma similar al caso anterior, la redistribución del agua infiltrada continuará hasta que se logren condiciones de “equilibrio” en el perfil del suelo.

Por otro lado, si se mide en cualquier momento la tensión del agua en diversos puntos del perfil enraizado del suelo, se encontrarán diferencias en la mayoría de casos, dependiendo de su profundidad respecto a la superficie del suelo así como de la proximidad o lejanía de las raíces y raicillas de la planta, de los drenes o de la napa freática en el perfil del suelo. Todo esto significa que la energía del agua por unidad de volumen es diferente en los diferentes puntos del perfil del suelo lo cual genera el movimiento del agua entre los puntos.

El movimiento del agua hacia las raíces, en un suelo no saturado, está presente en todo momento, ya que es una respuesta al mismo proceso de evapotranspiración. Es de remarcar que no se puede presentar simultáneamente ascensión capilar y percolación. En forma general, se puede decir que el agua se mueve de un punto de mayor potencial a uno de menor potencial, tal como se indica en la figura:



El flujo de agua es desde el punto A hacia B, ya que como se trata de presiones negativas (succiones), el potencial en A es mayor que en B.

Los factores más importantes que influyen en la velocidad del flujo de agua en el suelo son los siguientes:

- El gradiente hidráulico o fuerza motriz, que es igual a la diferencia de potencial del agua entre dos puntos del suelo, dividida por la distancia que separa a ambos puntos.
- El grado de facilidad con que el suelo permite el flujo del agua, llamado

también como la capacidad de movimiento del agua en el suelo (conductividad hidráulica).

Todo lo anterior depende del tamaño y de la porción de los poros del perfil del suelo que están llenos de agua (contenido de humedad). En efecto, no es lo mismo hablar del movimiento del agua en los suelos saturados - donde todos los poros del suelo están llenos de agua - que en suelos no saturados, donde sólo una parte de los poros está con agua y el resto, sobre todo los poros más grandes están llenos de aire y no contribuyen al movimiento del agua en el suelo.

2.3.1 Movimiento del agua en suelos no saturados

Las leyes que gobiernan el movimiento del agua en suelos no saturados fueron desarrolladas a inicios del siglo pasado y en los últimos años, con el avance de la ciencia, se ha incrementado el desarrollo en este campo.

La Ley de Darcy, con pequeñas modificaciones, puede ser utilizada para analizar el movimiento del agua en suelos no saturados. Esta Ley, para el movimiento del agua en estas condiciones, se expresa mediante la relación:

$$V = -i * K_c \dots\dots\dots(52)$$

Donde:

- V** = Velocidad media del flujo de agua en cm/seg, mm/h, m/día o cm/día;
- i** = Gradiente hidráulico o fuerza motriz del agua en suelos no saturados;
- K_c** = Conductividad capilar o conductividad hidráulica no saturada, que depende del contenido de humedad del suelo: en cm/seg, mm/h ó m/día.

Tal como se explicó anteriormente, el agua en suelos no saturados se encuentra sometida a una succión, tensión, presión negativa o potencial negativo. La presión negativa o potencial negativo del agua en el suelo se mide directamente mediante tensiómetros, hasta 0.8 bares u otros dispositivos.

El gradiente hidráulico en suelos no saturados es igual a la diferencia de presión hidráulica negativa entre dos puntos, dividida entre la distancia que los separa. Los valores de i pueden alcanzar hasta valores muy elevados ($> 1,000$); mientras que en suelos saturados, los gradientes son pequeños y generalmente menores de “ 1 “ Una gradiente de valor “ 1 “ es el causado por la gravedad.

La conductividad capilar o conductividad hidráulica no saturada (K_c) depende del contenido de humedad del suelo cuyo valor para un mismo suelo, va disminuyendo a medida que el suelo va secándose. El valor de K_c será máximo cuando el suelo esté saturado. En el cuadro siguiente, se presenta valores de K_c para dos tipos de suelos y diferentes succiones, reportados por investigadores.

Succión del agua del suelo (Bares)	Conductividad capilar (K_c) (cm/hora)	
	Suelo Arenoso	Suelo Medio
0	6.59	1.48
0.10	1.30	0.51
0.20	0.65	0.47
0.40	0.37	0.43
0.60	0.024	0.30
0.80	0.001	0.17
1.20	0.0009	0.021
2.00	0.00012	0.0121

Los valores de K_c disminuyen rápidamente al descender el contenido de humedad; debido, fundamentalmente, a lo siguiente:

- La magnitud de la conductividad hidráulica depende del área o sección transversal de los poros, a través de los cuales se desplaza el agua. En un suelo saturado, el área transversal de dichos poros es máxima, mientras que a medida que va disminuyendo el contenido de humedad del suelo se produce una disminución del área transversal de los poros y consecuentemente va dificultándose el desplazamiento del agua en el suelo.

- El aumento de la tensión del agua en un suelo pesado origina que las partículas de arcilla se aproximen entre ellas. Ello produce una disminución del tamaño y volumen de los poros; y en consecuencia, se dificulta el desplazamiento del agua en el suelo.
- La disminución del contenido de humedad en el suelo produce, también, un alargamiento de las líneas de flujo en el suelo.
- A tensiones bajas de humedad del suelo (correspondientes a suelos con contenido de humedad mayores que la capacidad de campo) para suelos arenosos, los valores de K_c son más altos que para suelos francos o pesados; mientras que para tensiones mayores, esta situación se invierte totalmente, debido básicamente a la mayor capacidad de retención de agua por estos suelos y a su mayor sección transversal de los poros.

Por otro lado, debe tenerse presente que los procesos y fenómenos más importantes relacionados con el flujo del agua en el suelo y el ambiente de las plantas donde se desarrollan, ocurren en las condiciones de suelos no saturados; y en consecuencia, se explican mediante las leyes del movimiento del agua en suelos no saturados. Sobresalen entre dichos procesos y fenómenos: la infiltración, la redistribución del agua en el perfil del suelo después del riego o lluvia, el flujo del agua hacia las raíces, el flujo del agua hacia la superficie del suelo desde una napa freática, la evaporación del agua desde la superficie del suelo, el concepto de capacidad de campo y punto de marchitez permanente, entre otros.

2.3.2 Movimiento del agua en suelos saturados

En el año 1856, se establecieron las leyes del movimiento del agua en los suelos saturados. El investigador Darcy encontró que la velocidad del movimiento del agua que fluye, a través de una muestra de suelo de longitud L , puede ser expresada mediante la siguiente relación; conocida también como Ley de Darcy:

$$\boxed{V = \frac{H * K}{L}} \dots\dots\dots (53)$$

Donde:

- V** : Velocidad de flujo o de escurrimiento, expresado en cm/seg, cm/h ó mm/h;
- H** : Diferencia de presión hidráulica entre dos puntos considerados, expresada en cm;
- L** : Distancia entre los puntos considerados expresada en cm; y
- K** : Conductividad hidráulica o coeficiente de proporcionalidad de Darcy, cuyas unidades pueden ser cm/s, mm/s ó m/hora.

La relación anterior expresa que la velocidad de flujo del agua en suelos saturados es directamente proporcional al gradiente hidráulico. La relación H/L se denomina gradiente hidráulico o fuerza motriz.

El valor de la conductividad hidráulica del suelo saturado (K) sirve como un indicador cuantitativo de la permeabilidad del suelo al agua. Entre los factores que influyen en el valor de la conductividad hidráulica, se pueden citar los siguientes:

- Porosidad total del suelo;
- Distribución de los diversos tamaños de poros;
- Temperatura del agua del suelo;
- Cantidad y tipos de iones presentes en el agua;
- Cantidad de sodio en el suelo;
- Estabilidad de los agregados del suelo al hacer contacto con el agua, etc.

En el cuadro siguiente, se presentan valores de K que corresponden a diversos grados de permeabilidad de suelos saturados.

Conductividad hidráulica, K (cm/h)	Grado de permeabilidad al agua del suelo	Observaciones
<0.0025	No permeable	Suelo impermeable, difícil de humedecer. Inadecuado para cultivos.
0.0025 – 0.025	Permeabilidad muy lenta	Suelos de difícil drenaje. En estos suelos hay peligro de salinización por acumulación de sales.
0.025 – 0.25	Permeabilidad baja	Suelos que presentan baja aireación y en consecuencia deficiente desarrollo radicular
0.25 – 2.5	Permeabilidad media	Suelos con las mejores condiciones para retención de humedad y aireación.
2.5 – 25.0	Permeabilidad alta	Suelos livianos o de textura ligeramente gruesa.
≥25.0	Permeabilidad muy alta	Suelos de textura gruesa: arena

Las leyes del movimiento del agua en suelos saturados resultan de particular utilidad en los siguientes casos:

- En la explotación de aguas subterráneas; y
- En el diseño de sistemas de drenaje.

La explotación de las aguas subterráneas se efectúa mediante la construcción de pozos tubulares. El rendimiento de estos pozos dependerá del potencial del acuífero y de la velocidad de flujo del agua hacia el pozo.

Los excesos de agua en las capas superficiales del suelo generan los llamados problemas de drenaje que inciden negativamente en la capacidad productiva de los suelos, debido fundamentalmente a:

- Presencia de una capa de suelo impermeable o muy poco permeable;
- Deficiente aireación en el perfil enraizado del suelo; y
- Incremento del contenido de sales en el perfil enraizado, cuando el agua subterránea es salina o el flujo de agua a estas zonas proviene de lugares con altas concentraciones de sales.

Estas situaciones se corrigen mediante la construcción de obras de drenaje a fin de bajar el nivel freático hasta la profundidad deseada. Los drenes normalmente se construyen a profundidades entre 1.50 a 2.50 m, dependiendo de la categoría del dren y del tipo de cultivo a instalar. Por otro lado, el espaciamiento entre drenes depende fundamentalmente de la conductividad hidráulica del suelo. A mayor conductividad hidráulica, mayor es el espaciamiento entre drenes, por tanto menor será el costo del sistema de drenaje.

Cuando se trata de suelos con problemas de salinidad, éstos pueden ser lavados mediante aplicaciones de agua. Sus percolaciones son evacuados mediante los sistemas de drenaje.

2.3.3 Movimiento del agua en el sistema planta – atmósfera

El fenómeno de absorción de agua por las plantas consiste en el desplazamiento de agua desde el suelo hasta las raíces. Este desplazamiento de agua ocurrirá si existe una diferencia de potencial de agua entre la raíz y el suelo; es decir, si el potencial del agua en el suelo es mayor que el potencial en la raíz. Cuando el agua disponible en el suelo disminuye mucho y consecuentemente el potencial o tensión se incrementa en forma considerable - se hace más negativo -, pudiendo en algunos casos ser menor que el potencial de la raíz. En estas condiciones, ya no podrá realizarse la absorción de agua. Respecto al agua marina, ésta no es apta para el riego por tener una alta concentración de sales y consecuentemente su potencial osmótico es muy alto (muy negativo), incluso en muchos casos es menor que el potencial del agua del suelo en su punto de marchitez permanente y que el potencial del agua en la raíz de la mayoría de las plantas.

La absorción de agua del suelo se efectúa principalmente a través de la zona pilífera (zona próxima al ápice de las raíces principales o secundarias), llamada así por tener gran cantidad de pelos absorbentes, que son largos y delgados. Poseen, además, una elevada relación superficie/volumen, y pueden introducirse incluso en los poros más pequeños del suelo. Los pelos absorbentes incrementan así el área de contacto entre la raíz y el suelo, la capacidad de exploración del suelo y consecuentemente la capacidad de absorción de agua.

Cuando el agua ha entrado en contacto con la superficie de la raíz, seguirá en dirección centrípeta desde la periferie de la raíz hasta los vasos xilemáticos del cilindro central, debido fundamentalmente a la diferencia de potencial entre ambos. El xilema es, por lo tanto, el tejido conductor del agua y de los nutrientes absorbidos por las raíces al resto de órganos de la planta.

En el xilema de la raíz, se genera la llamada presión radical o radicular que empuja al agua verticalmente hacia arriba. Esta presión radical se origina debido a la acumulación en el xilema de la raíz de iones transportados por el agua absorbida. Esta acumulación de iones aumenta la concentración y consecuentemente genera una disminución del potencial del xilema. La diferencia de potencial hídrico generado producirá una entrada adicional de agua desde la corteza hasta el xilema, incrementando su potencial de presión (Ψ_p) que generará una presión hidrostática, la misma que se manifestará como presión radical.

Una vez que el agua, con iones transportados y moléculas disueltas, se encuentra en el xilema de la raíz, asciende a través de los lúmenes o “conductos” de tráqueas y traqueidas; y se distribuye por ramas y hojas hasta las últimas terminaciones xilemáticas del tejido foliar. El xilema es un tejido especial que sirve para el transporte ascendente del agua a lo largo de la planta, debido fundamentalmente a una diferencia de potencial o tensión entre las terminaciones foliares del xilema y la raíz.

Por mucho tiempo, se pensó que la presión radical era el principal factor de la ascensión de agua por el xilema hasta las hojas. Actualmente, se conoce que otros procesos explican mejor este ascenso de agua y que la presión radical sólo contribuye a este movimiento en forma relativamente poco significativa, debido a que no alcanza valores muy elevados; salvo contados casos sobre todo en la noche o en condiciones de alta humedad y baja tasa de transpiración. Cuando la tasa de transpiración es alta, el agua no se acumula en la raíz; y no se desarrollan presiones positivas en el xilema, por el contrario las presiones son negativas o de tensión.

Para poder comprender mejor el origen de la tensión que se genera en el xilema, es necesario tener presente que, desde las partes terminales del xilema de la hoja, el agua sale al exterior a través del parénquima

hasta alcanzar las paredes celulares que limitan los abundantes espacios intercelulares del mesófilo; para, luego, evaporarse y entrar en la fase de transpiración. A medida que las moléculas de agua se evaporan y se separan de la fase líquida, disminuye el potencial de las paredes celulares evaporantes, pues las fuerzas de absorción de las fibras celulósicas ejercen un mayor efecto sobre el potencial mátrico del agua más cercana a la superficie. Así, se establece una diferencia de potencial hídrico entre esas paredes, y las que se sitúan un poco por detrás en el camino que se venía describiendo. Esto genera un desplazamiento del agua hacia las paredes evaporantes, con lo cual la caída de potencial se transmite al mesófilo y luego hasta las terminaciones del xilema. Se establece, así, una gradiente de potencial hídrico entre el xilema foliar y las superficies evaporantes que se mantiene por la pérdida continua de agua que supone la transpiración.

Debido a esta gradiente de potencial, el agua sale del interior de los elementos xilemáticos, estableciéndose allí una presión negativa o tensión, que gracias a la cohesión que existe entre las moléculas de agua, se genera el desplazamiento ascendente de la columna líquida. En el agua del xilema, se presenta así un potencial de presión (Ψ_p) negativo que se constituye como el principal componente de su potencial hídrico.

La tensión formada en las superficies evaporantes se transmite a lo largo del xilema, generando el ascenso de la columna de agua y la caída de potencial en el xilema de la raíz. Es decir, mientras haya transpiración, el potencial del xilema foliar se mantiene menor que el potencial del xilema de la raíz, ocasionando el ascenso de agua desde la raíz hasta las hojas. Asimismo, el potencial en el centro de la raíz es más bajo que el del suelo, y la absorción ocurre espontáneamente a favor de la gradiente de potencial.

Por otra parte, es fundamental e imprescindible que la columna de agua se mantenga físicamente continua debido a las fuerzas de cohesión existentes entre las moléculas de agua, para que así la tensión del xilema pueda transmitirse hasta la raíz, que en muchos casos representan varias decenas de metros.

El movimiento del agua en el sistema suelo-planta-atmósfera se debe fundamentalmente a las diferencias de potencial existentes, es decir cuando:

$$\Psi_{\text{suelo}} > \Psi_{\text{planta}} > \Psi_{\text{atmósfera}}$$

Más detalladamente, se puede expresar como:

$$\boxed{\Psi_{\text{suelo}} > \Psi_{\text{raíz}} > \Psi_{\text{xilema}} > \Psi_{\text{Hoja}} > \Psi_{\text{atmósfera}}} \dots\dots\dots(54)$$

La magnitud del potencial de la atmósfera ($\Psi_{\text{atmósfera}}$) o potencial hídrico del agua en estado de vapor en la atmósfera está determinado por la humedad relativa del aire, la cual a su vez depende fundamentalmente de la temperatura del aire. A menor humedad relativa y mayor temperatura, el potencial hídrico de la atmósfera será más bajo (más negativo); y, en consecuencia, la diferencia de potencial entre la atmósfera y la planta será mayor y la tasa de transpiración será también más elevada; pero cuando la HR = 100%, es decir está completamente saturada la atmósfera, aquí podría invertirse el movimiento del agua desde la atmósfera hacia el interior de la planta, siempre y cuando haya cierto déficit de humedad en el suelo. El potencial hídrico del agua en estado de vapor en la atmósfera, se determina por la fórmula:

$$\boxed{\Psi_v = 135 \times \text{MPa} * \ln \frac{\text{HR}}{100}} \dots\dots\dots(55)$$

Donde:

HR = Humedad relativa (%)

MPa = Megapascal = 10 bars

Ψ_v = Estado energético del agua en estado de vapor en la atmósfera

Se tiene que para:

HR = 100%	-----	$\Psi_v = 0$
HR = 99%	-----	$\Psi_v = -13.5 \text{ bars}$
HR = 98%	-----	$\Psi_v = -27.274 \text{ bars}$
HR = 95%	-----	$\Psi_v = -68 \text{ bars}$
HR = 90%	-----	$\Psi_v = -142 \text{ bars}$

En los mesófilos foliares, los valores típicos de potencial (Ψ) varían entre -2 bares y -15 bares, según la disponibilidad de agua en la planta.

2.4 La absorción y el transporte del agua

Normalmente, una planta se encuentra ubicada entre un alto potencial hídrico del suelo y el más bajo potencial hídrico de la atmósfera. Esta característica de una continuidad hídrica es propia del sistema suelo-planta-atmósfera, que en la práctica se constituye en una vía principal de circulación de agua entre el suelo y la atmósfera.

La intensidad del flujo (F) de agua depende directamente del potencial hídrico ($\Delta\Psi$) y está en razón inversa a la resistencia (r) que pueda existir entre el suelo y la raíz; entre la raíz y el tallo; entre el tallo y la hoja y finalmente entre la hoja y la atmósfera; matemáticamente, se puede representar de la siguiente manera:

$$F = \frac{(\Delta\Psi)_1}{r_1}(\text{suelo} - \text{raíz}) = \frac{(\Delta\Psi)_2}{r_2}(\text{raíz} - \text{tallo}) = \frac{(\Delta\Psi)_3}{r_3}(\text{tallo} - \text{hoja}) = \frac{(\Delta\Psi)_4}{r_4}(\text{hoja} - \text{atmósfera})$$

Normalmente, el sentido de la gradiente hidráulica es el siguiente:

$$\Psi_{\text{agua pura}} \rightarrow \Psi_{\text{suelo}} \rightarrow \Psi_{\text{raíz}} \rightarrow \Psi_{\text{xilema}} \rightarrow \Psi_{\text{hoja}} \rightarrow \Psi_{\text{atmósfera}}$$

Entonces, se puede afirmar que sólo circulará el agua por la planta si se mantiene una gradiente de potencial o una gradiente de presión a lo largo de la vía mostrada en el esquema anterior; es decir, si se conserva un aporte de energía para mantener dicho gradiente de potencial. El aporte de energía ocurre fundamentalmente mediante la transpiración en hojas y tallo y la presión radicular. El flujo continuo a lo largo de la planta se da mediante un flujo radial por la raíz y longitudinal por el xilema. La gradiente de presión o potencial puede operar, ya sea como presión positiva (presión radicular) desde abajo o como presión negativa o tensión originada por la transpiración en las hojas.

Las raíces son los órganos especializados en la sujeción de la planta y en la absorción del agua y nutrientes minerales del suelo. La absorción será máxima si se logra incrementar la superficie de las raíces ya sea por medio de los pelos absorbentes o pelos radiculares.

El movimiento o transporte del agua y nutrientes desde el suelo hacia la planta se efectúa en forma radial a través de las raíces. Cuando el agua alcanza el cilindro central de la raíz, el transporte por la planta se efectúa a través del xilema, el cual se constituye en el tejido conductor del agua y nutrientes desde el punto de absorción (raíz) al resto de órganos de la planta. El xilema forma todo un sistema continuo que parte desde las raíces, sigue por el tallo, y alcanza hasta las hojas y demás órganos aéreos.

Estructuralmente, el xilema no es un sistema homogéneo, y en él se pueden distinguir cuatro tipos de componentes: traqueidas, vasos, fibras y parénquima. Las dos primeras tienen sólo una función conductora, plenamente definida. Por otro lado, las fibras cumplen la función de soporte mecánico del órgano; y las células del parénquima, una función de reserva y transporte lateral.

El agua fluye a favor de la gradiente desde las células vecinas más internas, con mayor potencial hídrico, hacia las más externas que, como ya se ha mencionado, se encuentran en déficit hídrico.

La capacidad de un suelo de suministrar agua a las plantas no tiene carácter homogéneo. Depende, fundamentalmente, no sólo del aporte de agua; sino también de diversos factores del suelo (textura, estructura, materia orgánica, composición química, concentración de solutos, etc.) que definen la capacidad de retención y el grado de disponibilidad de agua para la planta.

En forma general, se puede decir que la **disponibilidad de agua de un suelo o el total de agua útil para las plantas** es la comprendida entre la **Capacidad de Campo** y el **Punto de Marchitez Permanente** que caracteriza a un suelo.

CAPÍTULO III

MOVIMIENTO DEL AGUA EN EL RIEGO

Es importante conocer el movimiento del agua durante el riego, ya que así se podrá lograr altas eficiencias. En el riego por gravedad, al iniciarse el riego se presenta un fenómeno combinado: desplazamiento del agua sobre la superficie del suelo (avance) y penetración al interior del mismo (Infiltración). Al cortarse el ingreso del agua al surco o melga, continúa un escurrimiento superficial durante un tiempo corto, llamado merma o recesión. En el riego por surcos, se tienen surcos abiertos y surcos cerrados. Cuando se trata de surcos abiertos, se presenta un fenómeno adicional que consiste en el escurrimiento de agua fuera del surco; mientras que en surcos cerrados, el escurrimiento se acumula en la parte final del surco.

En un surco o melga cerrada, el proceso de avance del frente de agua a lo largo de un surco o melga y su relación con la infiltración puede ser analizado partiendo de la siguiente ecuación de balance de agua:

$$6Q * t_a = B * (hI + hS) * X \quad \dots\dots\dots(1)$$

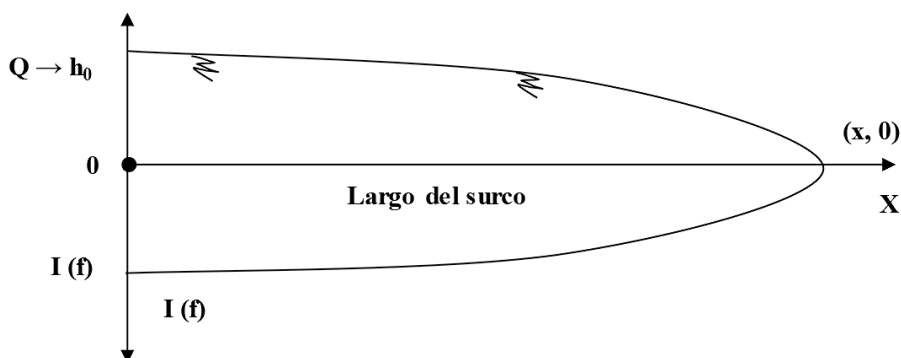
- Q** : Caudal que ingresa al surco o melga (/seg),
t_a : Tiempo de aplicación de Q (min),
B : Ancho del espejo de agua superficial en el surco o melga (m).
hI : Lámina de agua infiltrada promedio a lo largo del surco o melga (cm).
hS : Lámina de agua promedio sobre la superficie del suelo (cm), y
X : Longitud del surco o melga cubierta por agua (m).

La relación anterior representa una ecuación de balance, que se expresa matemáticamente:

$$\text{Agua que Ingresa} = \text{Agua Infiltrada} + \text{Agua sobre la superficie del surco o melga}$$

La representación del avance e infiltración del frente de agua en el riego por gravedad se muestra en la Figura N°1.

Figura N°1.- Perfil de distribución de la lámina infiltrada y lámina de agua sobre el suelo, durante el avance; en un riego por gravedad



Por lo explicado anteriormente; y, con fines didácticos, se puede señalar que en el proceso del riego por gravedad puede distinguirse tres etapas: avance, infiltración y recesión o merma.

En el caso de un surco abierto, la ecuación de balance es la siguiente:

$$\text{Agua que ingresa} = \text{Agua infiltrada} + \text{Agua sobre la superficie} + \text{Agua que sale del surco}$$

3.1 El avance del agua en el riego por gravedad

Es importante conocer cómo se produce el avance del agua sobre el surco o melga en el riego por gravedad para poder efectuar un diseño apropiado del sistema de riego. Los factores más importantes que determinan la velocidad de avance son:

- Pendiente longitudinal del fondo del surco o melga;
- Cantidad de flujo (cantidad de agua) por surco o metro de ancho de melga;
- Forma del surco o melga;
- Rugosidad de la superficie del terreno;
- Nivel de humedad del suelo;
- Características físico-químicas del suelo; y
- Otros parámetros de menor significación.

Varios autores están de acuerdo que el avance del frente de agua sobre el surco o melga puede ser expresado como una función exponencial de la variable tiempo, de la forma:

$$\boxed{X = pT_x^m} \dots\dots\dots (2)$$

X : Longitud de avance (m) al tiempo T_x ; $0 \leq x \leq L$;

p : Coeficiente empírico de la función de avance;

T_x : Tiempo de avance (min);

m : Coeficiente empírico de la función de avance; $0 < m < 1$; y

L : Longitud del surco o melga (m).

Los parámetros “p” y “m” tienen significado físico:

El parámetro “p” es una constante empírica que depende, principalmente, de la pendiente longitudinal del surco o melga, del caudal de riego y de la rugosidad de la superficie; mientras que el parámetro “m” depende principalmente de las características de infiltración del suelo. En la Figura N°2, se muestran unas pruebas de avance con diferentes caudales.

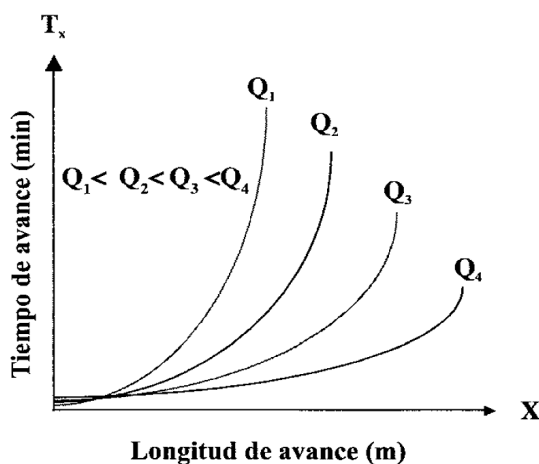


Figura N°2.- Representación de una prueba de avance con diferentes caudales

a) Desarrollo de una prueba de avance

La prueba de avance permite obtener la información longitud de avance - tiempo. Sobre esa base, se determinan los parámetros de la función propuesta en la ecuación N°2. La recesión permite obtener la información: longitud de surco en la que desaparece la lámina de agua versus el tiempo. Se mide después de cortar el ingreso de agua al surco o melga, y dura hasta que desaparezca todo el agua que haya sobre la superficie del suelo.

Normalmente, la prueba de avance se desarrolla para varios caudales por separado. En el desarrollo de una prueba de avance, se siguen los siguientes pasos:

- Selección del lugar donde se efectuarán las pruebas.
- Colocar estacas o puntos de referencia cada 10 ó 20 m a lo largo de cada surco o melga, según la longitud total de éstos.
- Medición de la cantidad de agua que ingresa al surco o melga, con sifón u otro medidor pequeño, principalmente Parshall o Chamberlain de capacidad hasta de 6 – 8 Ips para surcos y de hasta 30 Ips para melgas. En caso de usarse el medidor, éste debe ser instalado a unos

3 a 5 m a partir de la cabecera, ya que si se usa sifones, se sacará el agua directamente de la acequia al surco o melga,

- La prueba se inicia con la derivación del agua de la acequia regadera hacia el surco o melga. Luego, se irá registrando el tiempo que demora en llegar el agua a cada uno de los puntos de referencia instalados. Asimismo, se tendrá cuidado de mantener constante el caudal seleccionado durante toda la prueba. En la Figura N°3, se muestra un perfil de distribución del agua sobre la superficie de surco y la infiltración del agua durante el avance. Una curva típica de avance y recesión puede verse en la figura N°4.

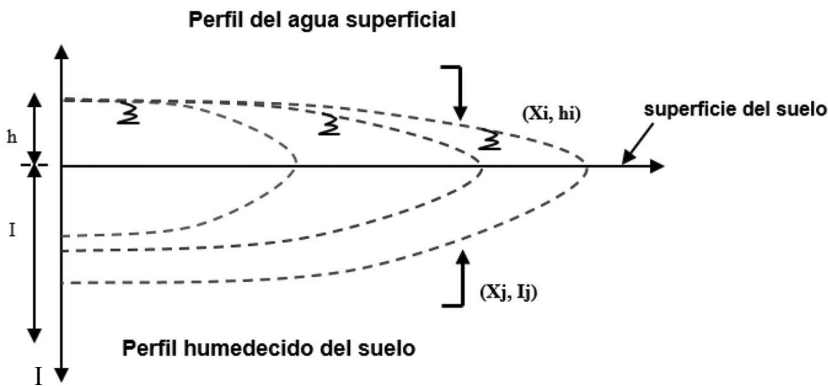


Figura N°3.- Perfil de distribución del agua sobre la superficie del surco y de la lámina infiltrada durante el avance.

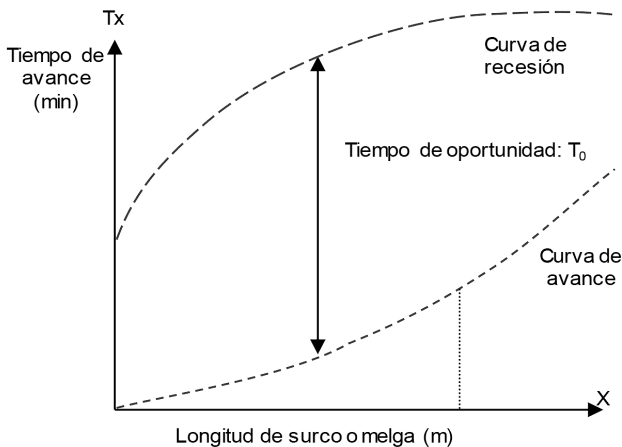


Figura N°4.- Curvas típicas de una función de avance y recesión

b) Determinación del caudal máximo no erosivo

Para la determinación del caudal máximo no erosivo, se siguen los siguientes pasos:

- Se calcula el caudal máximo no erosivo teórico mediante la ecuación:

$$Q = \frac{38}{s} \dots\dots\dots (3)$$

Donde:

Q = Caudal máximo no erosivo teórico, (lpm)

S = Pendiente del fondo del surco o melga, (%).

- Respecto a la velocidad del agua en el surco o melga se han dado los límites máximos siguientes: suelos erosivos, 0.15 m/s.; suelos menos erosivos, 0.18 m/s.
- Se seleccionan caudales menores y mayores al determinado en el paso anterior.
- Se efectúan las pruebas de avance con los caudales seleccionados, y se observa con cuál de ellos se presenta erosión significativa; determinándose así el caudal máximo no erosivo.

c) Registro y cálculo de la función de avance

El registro de datos de campo referentes a longitud de avance y hora de lectura se anotan en las columnas (1) y (2) del Cuadro N°1. Basado en los datos de campo del Cuadro N°1, se procede a llenar el resto de columnas del Cuadro N°2, con los cuales se calculan los parámetros de la función de avance.

Cuadro N°1.- Prueba de avance

Campo: Cultivo:
 Textura: Edad:
 Prueba N°: Fecha: Observador:
 Observaciones:

[illegible]

Cuadro N°2.- Prueba de avance

Datos para el cálculo de la función de avance

Hora Lectura	Longitud de Avance, x (m)	Tiempo de Avance, T _x (min)	Y = Log x	Z = Log T _x	Z*Y	Y ²	Z ²

d) Determinación de la función de avance

La función de avance se obtiene mediante los métodos analíticos y gráficos.

d.1) Método analítico o matemático

- Cálculo de los parámetros de la función:

Dada la función:

X = pT_x^m

..... (4)

Linealizándola, se obtiene: $\log X = \log p + m * \log T_x$; que puede ser escrita bajo la forma de un modelo lineal: $Y = N + m * Z$

Expresión que corresponde a un modelo lineal típico, donde:

$$Y = \log x; \quad N = \log p; \quad Z = \log T_x$$

Aplicando la técnica de los mínimos cuadrados, se obtiene que:

$$\mathbf{m} = \frac{n \sum Y_i Z_i - \sum Y_i \sum Z_i}{n \sum Z_i^2 - (\sum Z_i)^2}$$

$$\mathbf{N} = \frac{\sum Y_i}{n} - \mathbf{m} \frac{\sum Z_i}{n} = \bar{Y} - \mathbf{m} \bar{Z}$$

Luego: $p = \text{Antilog } N$

Con los parámetros $\mathbf{m}$ y $\mathbf{p}$, se tiene definida la función de avance (4).

Cálculo del coeficiente de determinación (r^2):

$$\mathbf{r}^2 = \frac{\left(\sum Y_i Z_i - \frac{\sum Z_i \sum Y_i}{n} \right)^2}{\left(\sum Z_i^2 - \frac{(\sum Z_i)^2}{n} \right) \left(\sum Y_i^2 - \frac{(\sum Y_i)^2}{n} \right)} \dots\dots\dots (5)$$

d.2) Método gráfico

Este método consiste en plotear los pares de valores: Tiempo de avance – longitud de avance, obtenidos en la prueba respectiva; en un papel doble logarítmico de 2 ó 3 ciclos. En las ordenadas, se plotea la longitud de avance; y, en las abscisas, el tiempo de avance. Luego, se traza la recta de mayor ajuste, a la cual se le determina su pendiente y su intersección con las ordenadas. Se obtiene, así, los parámetros de la función matemática correspondiente.

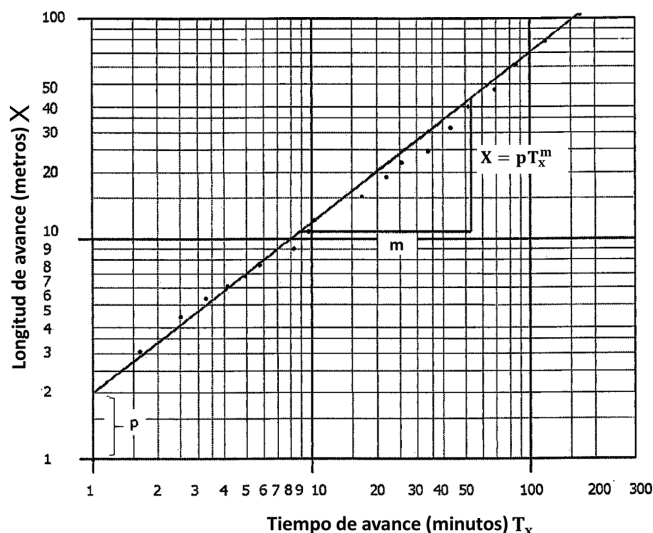


Figura N°5.- Determinación de la función de avance – método gráfico

3.2 Movimiento del agua en el riego a presión

El riego a presión se refiere fundamentalmente al riego por aspersión, microaspersión y goteo. En todos ellos, se busca lograr un perfil uniforme de humedecimiento. En los sistemas de riego por aspersión y microaspersión, el agua se aplica en forma de lluvia. En este caso, un elemento fundamental que debe tenerse en cuenta en el diseño del sistema de riego es que la intensidad de la lluvia debe ser menor o igual que la tasa de la velocidad de infiltración básica del suelo, a fin de evitar un encharcamiento o un escurrimiento superficial del agua aplicada y lograr un perfil de humedecimiento uniforme del suelo.

En un sistema de riego por goteo, donde el agua se aplica gota a gota, debe tenerse muy en cuenta en el diseño que la cantidad de agua descargada por un gotero debe ser menor o igual que la tasa de la velocidad de infiltración básica del suelo. Esto evita un encharcamiento o un escurrimiento superficial del agua aplicada.

El área humedecida de un gotero constituye el llamado “**bulbo humedecido**” cuya forma depende fundamentalmente del tipo de suelo,

descarga del gotero, tiempo de duración del riego y la frecuencia del riego. En un “**bulbo humedecido**”, existe una relación estrecha entre la dimensión horizontal (radio de humedecimiento) y la dimensión vertical (profundidad de humedecimiento) donde se distribuye el agua aplicada en el riego.

3.3 Infiltración

Las características de infiltración de un suelo constituyen un elemento básico para poder efectuar un adecuado diseño del sistema de riego, y determinar, así, el tiempo de riego apropiado.

La infiltración puede ser definida como la entrada vertical (gravitacional) del agua en el perfil del suelo. Los factores más importantes que afectan la velocidad de infiltración son:

- Características físicas del suelo;
- Carga hidrostática usada en la prueba;
- Contenido de materia orgánica y carbonatos;
- Características de humedad del suelo;
- Método de riego y manejo del agua;
- Acción microbiana en el suelo;
- Temperatura del suelo y del agua;
- Prácticas culturales realizadas; y
- Otros de menor significación.

La velocidad de infiltración es la relación entre la lámina de agua infiltrada y el tiempo en que se infiltra dicha lámina. Las unidades en que normalmente se expresan son: cm/hora, cm/minuto, mm/hora ó mm/minuto.

a) Definiciones Importantes

a.1) Velocidad de Infiltración Instantánea (*i*)

También es llamada, simplemente, como velocidad de infiltración. Puede ser definida como la velocidad de entrada vertical del agua en el perfil del suelo cuando la superficie del terreno se cubre con una lámina delgada

de agua. La función que describe la velocidad de infiltración en un punto cualquiera corresponde a un modelo exponencial de la forma:

$$i = a T_o^b \quad \dots\dots\dots (6)$$

Donde:

- i*** = Velocidad de Infiltración (L.T⁻¹), expresada en mm/hora, cm/hora u otras unidades;
- T_o*** = Tiempo de oportunidad (tiempo de contacto del agua con el suelo) expresado en minutos u horas;
- a*** = Coeficiente que representa la velocidad de infiltración para *T_o*= 1 min; y
- b*** = Exponente que varía entre 0 y -1.

El modelo que representa la ecuación (8) fue propuesto por Kostiakov en 1932.

a.2) Infiltración acumulada ó lámina infiltrada acumulada (***I_{cum}***)

Integrando la ecuación (6) entre los límites 0 y *T_o*, se obtiene la función de la infiltración acumulada:

$$i = a T_o^b$$

$$\frac{dI}{dt} = a T_o^b$$

$$dI = a T_o^b dt$$

$$\int_0^{I_{cum}} dI = \int_0^{T_o} a T_o^b * dt \quad \dots\dots\dots (7)$$

Resolviendo y simplificando la ecuación (7), se tiene:

$$I_{cum} = A * T_o^B \quad \dots\dots\dots (8)$$

Donde:

$$A = \frac{a}{b + 1} \quad y \quad B = b + 1$$

a.3) Velocidad de infiltración básica (i_b)

Llamada también infiltración básica, es el valor instantáneo de la velocidad de infiltración la cual ocurre cuando la variación de la velocidad de infiltración (i) con respecto a un periodo (tiempo) estándar es menor o igual que el 10% de su valor. El tiempo en el que se logra la velocidad de infiltración básica se puede determinar igualando la primera derivada con respecto del tiempo de la ecuación (6) con el 0.1 de la ecuación de la velocidad de infiltración instantánea, es decir:

$$\boxed{\frac{di}{dt} = -0.1 * i} \quad \dots\dots\dots (9)$$

Entonces:

$$\frac{d(a T_o^b)}{dt} = -0.1 * i$$

$$\frac{d(a T_o^b)}{dt} = -0.1 * (a T_o^b)$$

Derivando:

$$a * b * T_o^{b-1} = -0.1 * a * T_o^b$$

En este caso T_o sería el tiempo en el que ocurre la velocidad de infiltración básica; por lo tanto podríamos decir que T_o es igual a T_b . Colocando la ecuación calculada en función de T_b sería:

$$a * b * T_b^{b-1} = -0.1 * a * T_b^b$$

Resolviendo o despejando T_b de la ecuación anterior, se obtiene:

$$\boxed{T_b = -10 * b} \dots\dots\dots \text{en horas} \dots\dots\dots (10)$$

$$\boxed{T_b = -600 * b} \dots\dots\dots \text{en minutos} \dots\dots\dots (11)$$

Reemplazando T_b en la ecuación (6) por sus valores obtenidos en las ecuaciones (10) y (11), se obtiene la tasa de la velocidad de infiltración básica:

$$\boxed{i_b = a(-10 * b)^b, \text{ para } T_b \text{ en horas}}$$

$$\boxed{i_b = a(-600 * b)^b, \text{ para } T_b \text{ en minutos}}$$

a.4) Velocidad de infiltración promedio (i_p)

Llamada también infiltración promedio, es la relación entre la infiltración acumulada o lámina infiltrada acumulada (I_{cum}), y el tiempo acumulado (T_o).

$$\boxed{i_p = \frac{I_{cum}}{T_o}} \dots\dots\dots (12)$$

Reemplazando la función I_{cum} en la expresión anterior, se tiene:

$$i_p = \frac{\frac{a}{b+1} T_o^{b+1}}{T_o}$$

Simplificando la ecuación anterior, resulta:

$$\boxed{i_p = \frac{a}{b+1} T_o^b} \dots\dots\dots (13)$$

La representación en una escala normal de la variación de la lámina infiltrada acumulada y de la velocidad de infiltración instantánea se muestra en la Figura N°6.

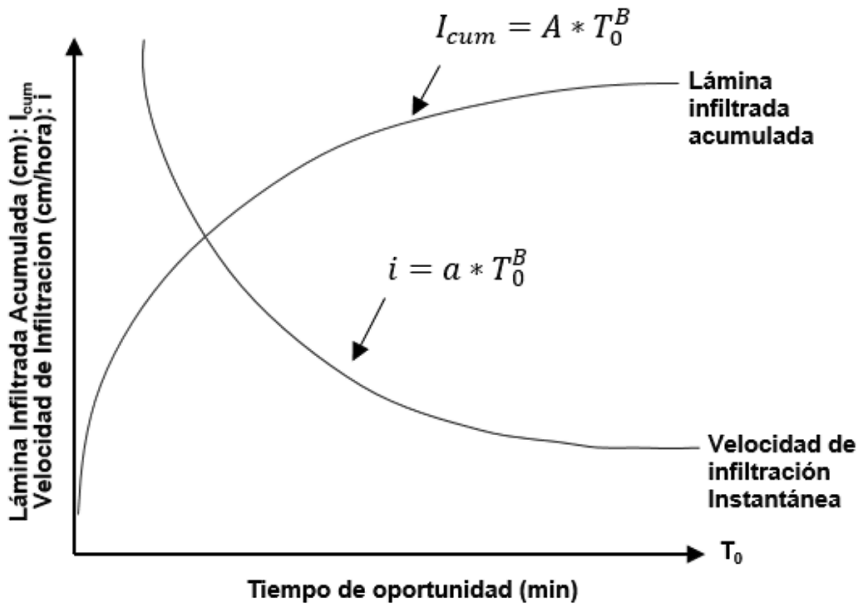


Figura N°6.- Variación de la lámina infiltrada y la velocidad de infiltración instantánea en función del tiempo de oportunidad.

b) Métodos de determinación de la velocidad de infiltración

La determinación de la velocidad de infiltración puede hacerse a través de los siguientes métodos, considerados los más importantes y los más usados:

- Método del cilindro infiltrómetro; y
- Método de surco.

b.1) Método del cilindro infiltrómetro

En la aplicación de este método, se siguen los siguientes pasos:

b.1.1) Selección y descripción del lugar

Las pruebas deben hacerse en los lugares representativos del terreno del cual se quiere conocer las características de infiltración. Asimismo, se determinará la textura, estructura (densidad aparente) y contenido de humedad del suelo; anotando si el suelo ha sido cultivado, cosechado recientemente, tipo de cultivos, presencia de costras, presencia de piedras, entre otras características.

b.1.2) Materiales usados

- Juego de cilindros infiltrómetros de acero o fierro galvanizado de 2 mm de espesor, de 30 y 40 cm de diámetro para los cilindros interior y exterior respectivamente, unos 40 cm de alto el cilindro interior y 25 cm, el cilindro exterior;
- Una plancha metálica o tablones de madera;
- Escalímetro o regla graduada;
- Cinta adhesiva o ganchos sujetadores de la regla graduada;
- Cronómetro;
- Comba;
- Nivel de carpintero;
- Lámina de plástico;
- Hoja de registro;
- Baldes;
- Lápices o tizas; y
- Un gancho metálico, medidor del nivel de agua,

b.1.3) Ejecución de la prueba

Una vez elegido el lugar donde se efectuarán las pruebas se procede a:

Instalación de los cilindros:

Introducir el cilindro exterior en el lugar seleccionado mediante el uso de una comba, golpeando la plancha metálica que se ha colocado sobre el cilindro. El cilindro se debe introducir en el suelo hasta unos 15 cm aproximadamente, luego se introduce el cilindro interior.

La introducción de los cilindros debe efectuarse verticalmente a fin de evitar que se alteren significativamente las condiciones de la superficie del suelo. Una vez instalados los cilindros, se remueve con cuidado el suelo que se encuentra adyacente a las paredes de éstos; y se coloca la regla graduada, fijándola adecuadamente en la parte externa del cilindro interior.

Luego, se extiende una lámina de plástico sobre la superficie del suelo del cilindro interior.

Llenado de los cilindros:

Una vez colocado el plástico en el cilindro interior, se procede a su llenado con agua, hasta alcanzar u obtener aproximadamente una lámina de 10 - 20 cm. El agua debe ser aplicada primero al cilindro exterior e inmediatamente al cilindro interior. Es preferible que ambos cilindros sean llenados simultáneamente lo cual requiere que 2 personas operen juntas. Llenados los cilindros, se procede a retirar el plástico del cilindro interior para iniciar inmediatamente las lecturas de la carga de agua.

El agua, entre los cilindros, es para tratar de anular la infiltración lateral que pueda presentarse en el cilindro interior. El nivel de agua en el cilindro interior y exterior debe ser aproximadamente el mismo. En la siguiente figura, se muestra la disposición del equipo para medir la infiltración por el método del cilindro infiltrómetro.

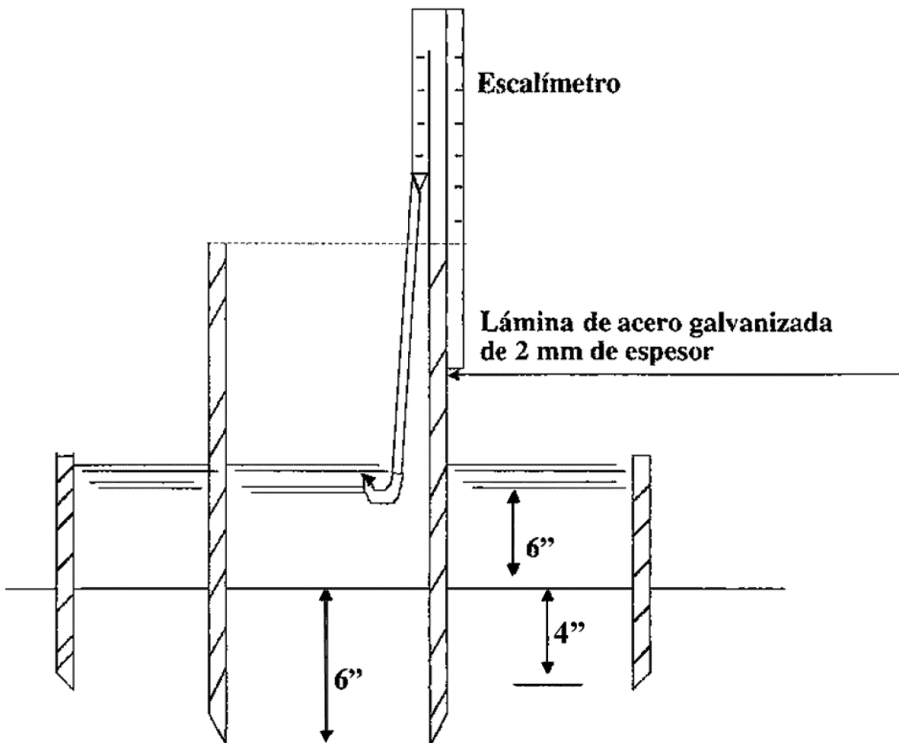


Figura N°7.- Disposición del equipo usado para medir la variación del nivel de agua en las lecturas del nivel de agua de los cilindros

Lecturas del nivel de agua

Retirado el plástico del cilindro interior, se procede a efectuar las lecturas del nivel de agua. Dicho nivel se medirá con el gancho metálico y el escalímetro o regla graduada, previamente instalados.

Las mediciones se continuarán normalmente con un intervalo de tiempo determinado. Al inicio serán intervalos de 1 a 2 minutos aproximadamente, luego se irán distanciando gradualmente cada 5, 10, 15, 20, 30 minutos; hasta finalmente completar la prueba.

Cuando se ha infiltrado en los cilindros una lámina de alrededor de 2.5 a 3.0 cm, se procede a llenarlos nuevamente, procurando alcanzar el mismo nivel inicial. Esta operación debe ser hecha rápidamente, para lo cual se debe efectuar una lectura antes e inmediatamente después del llenado, a fin de que el tiempo transcurrido en esta operación sea considerado cero. La duración de la prueba no debe ser menor de 2 horas, salvo en suelos de textura gruesa en los que puede ser sustantivamente menor.

En suelos francos y arcillosos, la duración de la prueba debe ser de 3 a 5 horas. En forma general, se indica que la duración de la prueba debe ser hasta que la tasa de infiltración sea sensiblemente constante.

b.1.4) Cálculo y registro de datos

- Los datos de campo se anotarán en las columnas (1) y (4) del Cuadro N°3.
- Sobre la base de los datos de campo tomados, se procede al llenado del resto de columnas del Cuadro N°3, obteniéndose así el Cuadro N°4.

b.1.5) Evaluación de los datos de infiltración

- Efectuar el ploteo en papel milimetrado: lámina infiltrada acumulada (I_{cum}) versus tiempo acumulado (T_o), luego trazar la curva de mayor ajuste.
- Determinar la función matemática respectiva y su coeficiente de determinación (r^2).

- Efectuar el ploteo de la velocidad de infiltración y trazar la curva de mayor ajuste.
- Determinación de su función matemática y su coeficiente de determinación respectivo (r^2).

b.1.6) Determinación de los parámetros de la función de la velocidad de infiltración y de la lámina infiltrada acumulada

La determinación de los parámetros de la función de la velocidad de infiltración puede hacerse mediante el método gráfico o el método analítico, para lo cual se utiliza la información de campo obtenida: velocidad de infiltración (cm/hora) y tiempo acumulado (min). La determinación se efectúa en forma similar a lo utilizado en el cálculo de la función de avance.

• Método analítico

Dada la información de campo obtenida en la prueba de infiltración, se procede al cálculo de los parámetros, mediante la información del Cuadro N°5.

Cálculo de los parámetros de la función de la lámina infiltrada acumulada (I_{cum})

Dado el modelo (misma ecuación que la ecuación (8)):

$$\boxed{I_{cum} = AT_o^B} \quad \dots\dots\dots (14)$$

El cálculo de los parámetros se hace mediante la técnica de los mínimos cuadrados y para lo cual se utilizan las siguientes relaciones:

$$\boxed{B = \frac{n(\sum X_i Y_i) - \sum X_i \sum Y_i}{n \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2}} \quad \dots\dots\dots (15)$$

Donde:

$$Y = \log I_{cum}$$

$$X = \log T_o$$

Para calcular el parámetro A, de la ecuación (14), primero se calcula A_0 mediante la relación:

$$A_0 = \frac{\sum Y_i}{n} - \frac{B \sum X_i}{n} \quad \dots\dots\dots (16)$$

Donde:

$$A = \text{anti Log } (A_0)$$

Para conocer el grado de confiabilidad del modelo hallado, se calcula su coeficiente de determinación (r^2), mediante la relación:

$$r^2 = \frac{\left(\sum X_i Y_i - \frac{\sum X_i \sum Y_i}{n} \right)^2}{\left(\sum X_i^2 - \frac{(\sum X_i)^2}{n} \right) \left(\sum Y_i^2 - \frac{(\sum Y_i)^2}{n} \right)} \quad \dots\dots\dots (17)$$

Cálculo de los parámetros de la función de la velocidad de infiltración ()
Dado el modelo (misma ecuación que la ecuación 6):

$$i = a T_0^b \quad \dots\dots\dots (18)$$

El problema consiste en calcular los parámetros a y b, para lo cual se utiliza la técnica de los mínimos cuadrados y se procede en forma similar al caso anterior.

$$b = \frac{n(\sum X_i Y_i) - \sum X_i \sum Y_i}{n \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2} \quad \dots\dots\dots (19)$$

$$a_0 = \frac{\sum Y_i}{n} - \frac{b \sum X_i}{n} \quad \dots\dots\dots (20)$$

$$a = \text{Anti Log } (a_0)$$

Además:

Para conocer el grado de confiabilidad del modelo hallado, se calcula su coeficiente de determinación (r^2):

$$r^2 = \frac{\left(\sum x_i y_i - \frac{\sum x_i \sum y_i}{n}\right)^2}{\left(\sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n}\right)\left(\sum y_i^2 - \frac{(\sum y_i)^2}{n}\right)} \dots\dots\dots (21)$$

Ejemplo de aplicación:

De una prueba de infiltración, se obtuvo la información que se presenta en el Cuadro N°4. Sobre la base de dicha información se elaboran el Cuadro N° 5 y N° 6. Luego, se calculan los parámetros tanto de la función de la lámina infiltrada acumulada, así como de la velocidad de infiltración instantánea y su correspondiente coeficiente de determinación (r^2).

Por otro lado, también se determinan las mismas funciones mediante el método gráfico. Basado en dicha información, se elaboran el Cuadro N° 5 y N° 6.

Cuadro N°3.- Prueba de Infiltración

Campo : Observador:
Fecha : N° de Prueba :
Método : Textura :
Observaciones :

Hora (1)	Tiempo de oportunidad (min)		Lectura	Lámina Infiltrada (cm)		Velocidad de Infiltración (cm/h)	
	Parcial (2)	Acumulado (T _o) (3)	(cm) (4)	Parcial (5)	Acum (I _{cum}) (6)	Instantánea (i) (7)	Promedio (i _p) (8)

Cuadro N°4.- Prueba de Infiltración

Campo : San Rafael

Observador: Alberto Vásquez

Fecha : 20-04-95

N° de Prueba : 1

Método: Cilindros Infiltrómetros

Textura : Suelo Franco

Observaciones : Campo recién cosechado

Hora	Tiempo de oportunidad (m)		Lámina Infiltrada (cm)		Velocidad de Infiltración (cm/h)	
	Parcial	Acumulado	Parcial	Acumulada	Instantánea	Promedio
10.00	00	-	-	-	-	-
10.01	01	1	0.90	0.90	54.0	54.0
10.02	01	2	0.50	1.40	30.0	42.0
10.03	01	3	0.70	2.10	42.0	42.0
10.04	01	4	0.40	2.50	24.0	37.5
10.05	01	5	0.35	2.85	21.0	34.2
10.06	01	6	0.30	3.15	18.0	31.5
10.07	01	7	0.35	3.50	21.0	30.0
10.10	03	10	0.75	4.25	15.0	25.5
10.13	03	13	0.70	4.95	14.0	22.8
10.16	03	16	0.80	5.75	16.0	21.6
10.21	05	21	1.30	7.05	15.6	20.1
10.26	05	26	1.80	8.85	21.6	20.4
10.31	05	31	1.20	10.05	14.4	19.4
10.41	10	41	2.60	12.65	15.6	18.5
10.51	10	51	2.80	15.45	16.8	18.1
11.01	10	61	2.80	18.25	16.8	17.9
11.21	20	81	4.90	23.15	14.7	17.1
11.41	20	101	4.20	27.35	12.6	16.2
12.21	40	141	8.40	35.75	12.6	15.2
13.21	60	201	12.30	48.05	12.3	14.3

Sobre la base de esta información, se elaboran los cuadros N° 5 y N°6, que se utilizan para el cálculo de la función de Lámina Infiltrada Acumulada y Velocidad de Infiltración, respectivamente.

Cuadro N°5.- Cálculo de la Función de la Lámina Infiltrada Acumulada (I_{cum})

Tiempo de Oportunidad Acumulado (min) (T_o)	Lámina Infiltrada Acumulada (cm) (I_{cum})	Log $T_o = X$	Log (I_{cum}) = Y	X.Y	X^2	Y^2
1	0.9	-	-	-	-	-
2	1.4	0.3010	0.1461	0.04395	0.0906	0.0213
3	2.1	0.4771	0.3222	0.15374	0.2276	0.1038
4	2.5	0.6021	0.3979	0.23958	0.3625	0.1583
5	2.85	0.6990	0.4548	0.31794	0.4885	0.2069
6	3.15	0.7782	0.4983	0.38778	0.6055	0.2483
7	3.5	0.8451	0.5441	0.45979	0.7142	0.2960
10	4.25	1.0000	0.6284	0.62838	1.0000	0.3949
13	4.95	1.1139	0.6946	0.77372	1.2409	0.4825
16	5.75	1.2041	0.7597	0.91471	1.4499	0.5771
21	7.05	1.3222	0.8482	1.12147	1.7483	0.7194
26	8.85	1.4150	0.9469	1.33992	2.0021	0.8967
31	10.05	1.4914	1.0022	1.49463	2.2241	1.0043
41	12.65	1.6128	1.1021	1.77745	2.6011	1.2146
51	15.45	1.7076	1.1889	2.03021	2.9158	1.4135
61	18.25	1.7853	1.2612	2.25173	3.1874	1.5908
81	23.15	1.9085	1.3645	2.60424	3.6423	1.8620
101	27.35	2.0042	1.4369	2.88009	4.0173	2.0648
141	35.75	2.1492	1.5532	3.33813	4.6194	2.4127
201	48.05	2.3032	1.6817	3.87327	5.3047	2.8280
suma		24.7201	16.8319	26.63073	38.4422	18.4959

Cuadro N°6.- Cálculo de la función de la velocidad de infiltración instantánea (i)

Tiempo de oportunidad acumulado (min) (T_o)	Velocidad de infiltración instantánea (i) (cm/hora)	$X = \text{Log}$ T_o	$Y = \text{Log} (i)$	$X.Y$	X^2	Y^2
1	54.0	-	-	-	-	-
2	30.0	0.3010	1.1471	0.4447	0.0906	2.1819
3	42.0	0.4771	1.6232	0.7745	0.2276	2.6349
4	24.0	0.6021	1.3802	0.8310	0.3625	1.9050
5	21.0	0.6990	1.3222	0.9242	0.4885	1.7483
6	18.0	0.7782	1.2553	0.9768	0.6055	1.5757
7	21.0	0.8451	1.3222	1.1174	0.7142	1.7483
10	15.0	1.0000	1.1761	1.1761	1.0000	1.3832
13	14.0	1.1139	1.1461	1.2767	1.2409	1.3136
16	16.0	1.2041	1.2041	1.4499	1.4499	1.4499
21	15.6	1.3222	1.1931	1.5776	1.7483	1.4231
26	21.6	1.4150	1.3345	1.8882	2.0021	1.7808
31	14.4	1.4914	1.1584	1.7275	2.2241	1.3418
41	15.6	1.6128	1.1931	1.9243	2.6011	1.4231
51	16.8	1.7076	1.2253	2.0923	2.9158	1.5014
61	16.8	1.7853	1.2253	2.1876	3.1874	1.5014
81	14.7	1.9085	1.1673	2.2278	3.6423	1.3626
101	12.6	2.0042	1.1004	2.2055	4.0173	1.2108
141	12.6	2.1492	1.1004	2.3649	4.6191	1.2108
201	12.3	2.3032	1.0899	2.5103	5.3047	1.1879
suma		24.7200	23.6939	29.6770	38.4419	29.8853

Reemplazando valores del Cuadro N°5, en la ecuación (15) se obtiene:

$$B = \frac{19(26.63073) - (24.7201)(16.8319)}{19(38.4422) - (24.7201)^2}$$

$$\therefore \boxed{B = 0.7534}$$

Luego, en base a la ecuación (16), se obtiene:

$$A_o = \frac{16.8319}{19} - \frac{0.7534(24.7201)}{19}$$

$$\therefore \boxed{A_o = -0.0943}$$

Como se sabe que: $A = \text{antiLog}(A_o)$

$$A = \text{antiLog}(-0.0943)$$

$$\therefore \boxed{A = 0.8048}$$

Finalmente, la ecuación queda definida por:

$$\boxed{I_{\text{cum}} = 0.8048T_o^{0.7534}}$$

Para conocer el grado de confiabilidad de la ecuación hallada, se calcula su coeficiente de determinación (r^2), en base a la ecuación (17), obteniéndose:

$$r^2 = \frac{\left(26.63073 - \frac{(24.7201)(16.8319)}{19}\right)^2}{\left(38.4422 - \frac{(24.7201)^2}{19}\right)\left(18.4959 - \frac{(16.8319)^2}{19}\right)}$$

$$\therefore r^2 = 0.9945$$

Esto significa que el 99.45% de la variación de la lámina infiltrada acumulada es explicada por el tiempo y el modelo es altamente confiable.

Reemplazando valores del cuadro N°6, en las ecuaciones (19) y (20), se obtiene:

$$b = \frac{19(29.677) - (24.7200)(23.6939)}{19(38.4419) - (24.7200)^2}$$

$$b = -0.183$$

$$a_o = \frac{23.6939}{19} - (0.1831) \left(\frac{24.7200}{19} \right)$$

$$a_o = 1.4852$$

$$a = \text{antiLog}(a_o)$$

$$a = \text{anti Log}(1.4852)$$

$$a = 30.567$$

Para calcular el r^2 , se utiliza la ecuación (21), en base a lo cual se obtiene:

$$r^2 = 0.6232$$

Luego, la expresión de la velocidad de infiltración instantánea queda definida:

$$i = 30.6T_o^{-0.1831}$$

- **Método gráfico**

Aplicando el método gráfico y utilizando la información del cuadro N°5, se obtiene la función de la lámina infiltrada acumulada.

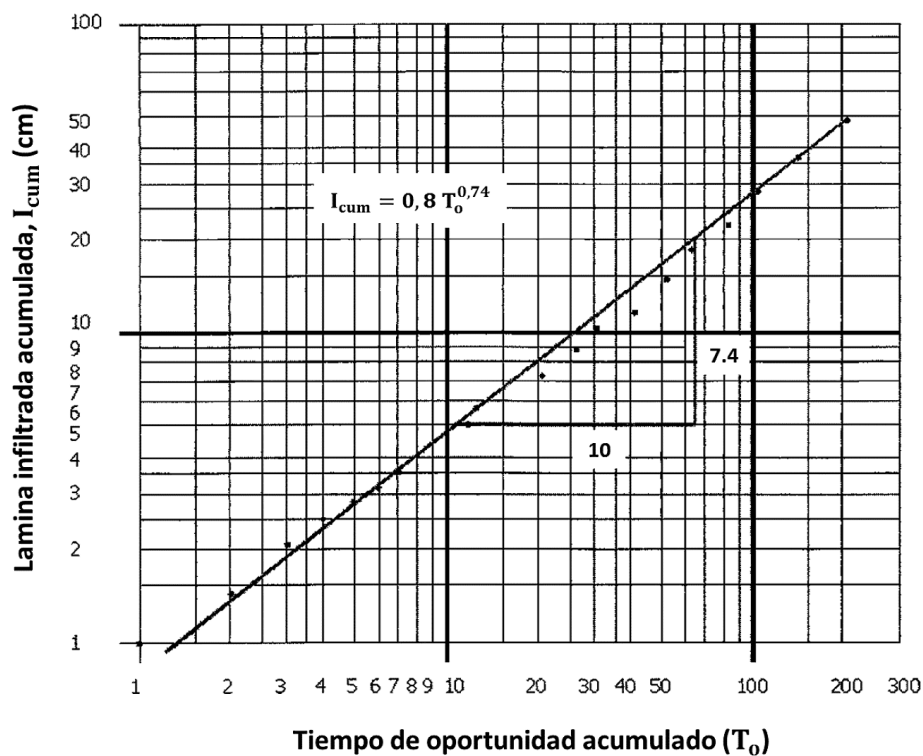


Figura N°8.- Determinación de la función de la lámina infiltrada acumulada, método gráfico

Aplicando el método gráfico y utilizando el cuadro N°6, se obtuvo:

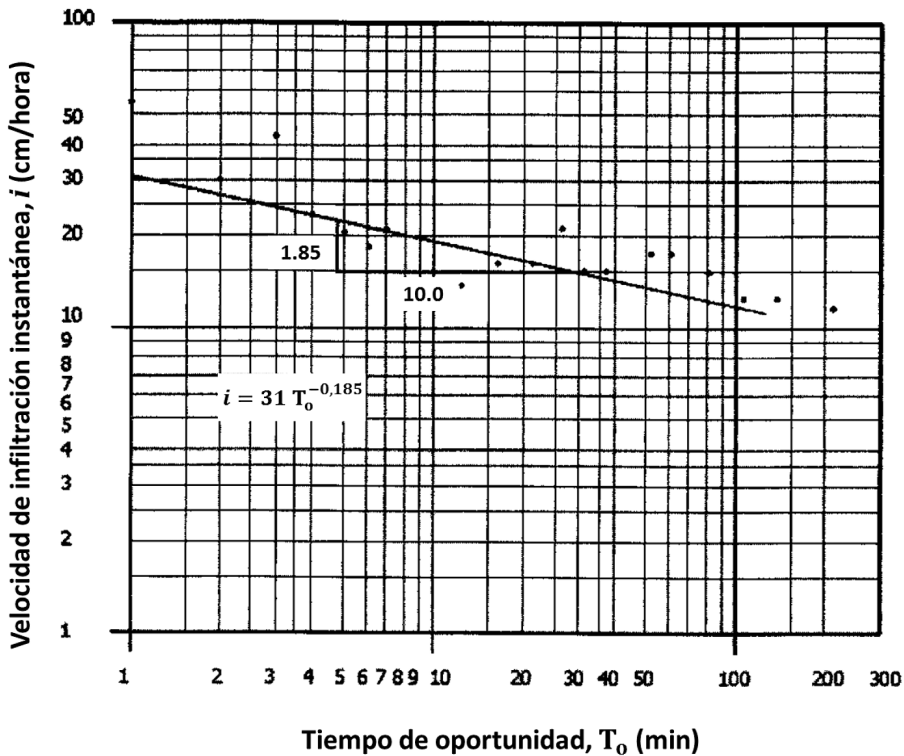


Figura N°9.- Determinación de la función de la velocidad de infiltración instantánea, método gráfico

b.2) Método del surco

Este método consiste en desviar agua de una acequia hacia los surcos, y se siguen los siguientes pasos:

- Derivar agua de la acequia regadora hacia los surcos. En esta prueba, es conveniente tomar 3 surcos y efectuar las mediciones de preferencia en el surco central. La derivación de agua hacia los surcos puede hacerse directamente o con sifones, teniendo cuidado de mantener una carga constante (caudal) de entrada al surco. El caudal a usarse debe ser menor o igual al caudal máximo no erosivo.
- Cuando el riego se hace con sifón, se instala un medidor pequeño (hasta de 6 - 8 /seg de capacidad) Parshall o Chamberlain, a una distancia de

20 - 30 m a partir de la cabecera. Cuando la derivación del agua de la acequia regadora no se hace con sifones, se usará un medidor adicional ubicado en la cabecera del surco (a 3 - 5 m a partir de la cabecera) y el otro medidor siempre ubicado a 20 - 30 m a partir del primer medidor.

- Aforo de los caudales tanto a la entrada como a la salida de los surcos, llevándose un registro de tiempo y caudal para cada uno de ellos y desde el momento en que el agua empieza a ser derivada. Las mediciones se inician a partir del momento en que el agua empieza a fluir por éste y terminan en el momento en que deja de fluir.
- Las mediciones del caudal deben hacerse inicialmente cada minuto y posteriormente ir distanciando a medida que se estabiliza el caudal, hasta llegar a intervalos de 5 a 10 minutos. La prueba debe durar en promedio de 2 a 5 horas, según el tipo de suelo.
- Registro de datos, el mismo que se efectúa llenando las columnas (1), (2), (6) y (7) del Cuadro N°7.
- Cálculo de la velocidad de infiltración instantánea columna (8) del Cuadro N°7 que se atribuye a un punto representativo de la longitud del surco.
- El cálculo se efectúa con la relación:

$$i = \frac{Q_1 - Q_2}{b * L} * 360 \dots\dots\dots (22)$$

$$\dots (23)$$

Donde:

Q_1 = Caudal de entrada (l/s)

Q_2 = Caudal de salida (l/s)

b = Separación o espaciado entre surcos (m)

L = Longitud de la separación entre los 2 medidores (m)

T_o = Tiempo de oportunidad acumulado promedio (min)

t_e = Tiempo transcurrido desde que el agua comienza a pasar por el primer medidor (min)

t_s = Tiempo transcurrido desde que el agua comienza a pasar por el segundo medidor (min)

i = Velocidad de infiltración (cm/hora)

- Materiales necesarios:

- Nivel
- Wincha
- Aforadores Parshall o Chamberlain de 2" de garganta
- Cronómetro
- Estacas
- Regla graduada
- Sifones
- Lampa
- Comba
- Formato de recopilación de datos (Cuadro N°7)

Procesamiento de datos

Realizada la prueba de infiltración en surcos, se procede a efectuar los cálculos y el llenado del Cuadro N°7.

Para determinar la función de la velocidad de infiltración, se procede como lo descrito en el método de cilindros infiltrómetros.

En el Cuadro N°8, se presenta la información que corresponde a una prueba de infiltración en surcos. El cálculo de la función de la velocidad de infiltración se hace con los datos de las columnas (5) y (8), respectivamente.

Cuadro N°8.- Prueba de Infiltración en Surcos

Campo : Santa Rosa Textura : Franca N° Prueba : 01
 Longitud de Prueba : 30 m Cultivo : Maíz Observaciones : El
 cultivo anterior fue maíz
 Edad del cultivo : 2 meses de edad
 Espaciamiento entre surcos (m) : 80 cm

Hora de lectura en las estaciones		Tiempo de lectura en las estaciones (min)		Tiempo Promedio Acumulado	Caudal (Q) (/seg)		Velocidad de Infiltración Instantánea (i)
Entrada	Salida	Entrada*(t _e)	Salida**(t _s)	(min)T _o	Entrada (Q ₁)	Salida (Q ₂)	(cm/hora)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
10.00	--	--	--	--	--	--	--
10.01	--	01	0	0.5	2.00	0.000	29.99
10.02	10.02	02	0	1.0	2.00	0.000	29.99
10.03	10.03	03	1	2.0	2.00	0.800	18.00
10.04	10.04	04	2	3.0	2.00	0.955	15.73
10.05	10.05	05	3	4.0	2.00	1.202	11.95
10.07	10.07	07	5	6.0	2.00	1.250	11.23
10.09	10.09	09	7	8.0	2.00	1.280	10.80
10.10	10.10	10	8	9.0	2.00	1.295	10.58
10.12	10.12	12	10	11.0	2.00	1.300	10.51
10.14	10.14	14	12	13.0	2.00	1.322	10.15
10.16	10.16	16	14	15.0	2.00	1.356	9.64
10.20	10.20	20	18	19.0	2.00	1.358	9.65
10.25	10.25	25	23	24.0	2.00	1.362	9.58
10.30	10.30	30	28	29.0	2.00	1.380	9.29
10.40	10.40	40	38	39.0	2.00	1.386	9.22
10.50	10.50	50	48	49.0	2.00	1.395	9.07
11.00	11.00	60	58	59.0	2.00	1.400	9.00
11.15	11.15	75	73	74.0	2.00	1.450	8.24
11.30	11.30	90	88	89.0	2.00	1.500	7.48
11.45	11.45	105	103	104.0	2.00	1.556	6.66
12.00	12.00	120	118	119.0	2.00	1.580	6.30
12.30	12.30	150	148	149.0	2.00	1.600	6.01
13.00	13.00	180	178	179.0	2.00	1.688	4.68

(*) La entrada se considera a la cabecera del surco, ya que utilizó un sifón.

(**) La salida se considera al punto donde se instaló el medidor Chamberlain, ubicado a 30 m del punto de entrada del primer medidor (sifón).

c) Factores que afectan la Infiltración

Los factores que afectan la tasa de infiltración pueden agruparse en factores que afectan el gradiente hidráulico y factores que afectan la conductividad hidráulica y el coeficiente de difusión. Para una discusión más amplia de los factores involucrados, éstos se agrupan de acuerdo a las características inherentes del suelo y relacionadas con las prácticas de manejo de agua y el suelo, es decir:

- Características físicas del suelo
- Características del perfil del suelo
- Características de humedad del suelo
- Método de riego y manejo del agua
- Calidad de agua; y
- Otros factores

Características físicas del suelo

La macro-porosidad del suelo es el primer factor que afecta la conductividad hidráulica en el estado de casi saturación; y, por lo tanto, también la velocidad de infiltración. La porosidad depende de la textura y estructura del suelo. El agua pasa más rápidamente a través del perfil del suelo de textura gruesa, con mayor porosidad no capilar, que en un suelo pesado en el cual predominan los poros capilares.

El contenido de arcilla, la composición mineralógica de ésta y la composición del complejo de intercambio son otros factores que deben considerarse. En efecto, suelos con alto contenido de arcilla montmorillonítica o illítica se contraen; y se hinchan alternadamente con el humedecimiento y desecación.

Los agentes cementantes del suelo tales como la materia orgánica y óxidos inorgánicos influyen en la formación de agregados; por lo tanto, mantienen una alta conductividad. La velocidad de entrada puede ser reducida por el debilitamiento de la estructura de una capa muy delgada de la superficie del suelo. Particularmente, cuando en el riego se aplica agua clara, la separación de agregados produce un sello superficial que

reduce la penetración del agua. El impacto de las gotas provenientes del riego por aspersión puede producir los mismos resultados. De otra manera, el depósito de sedimentos acarreados por el agua puede ser la causa del sellado superficial; esto es especialmente en las épocas de avenidas.

- **Características del perfil del suelo**

En suelos no estratificados uniformes, como los que se encuentran en muchas regiones áridas, la velocidad de entrada del agua depende de las condiciones físicas inherentes, siendo aproximadamente constante con la profundidad del suelo. Pero, con frecuencia, especialmente en climas húmedos, el perfil del suelo muestra estratificación, y la capacidad de infiltración puede variar considerablemente para horizontes de suelos individualmente diferenciados.

En caso de que un horizonte edáfico cerca de la superficie presente la menor capacidad de infiltración, el proceso total está entonces gobernado por la infiltración a través de esta capa. Sin embargo, si el estrato limitante está ubicado más profundamente en el perfil del suelo, la velocidad de entrada puede ser inicialmente alta, dependiendo de la capacidad de infiltración de los estratos superiores. Cuando el frente de la humedad alcanza un estrato menos permeable, la infiltración adicional de agua será determinada por la infiltración de las capas menos permeables.

Sobre una capa limitada, puede presentarse una cantidad de agua atrapada que no puede escapar lateralmente en el movimiento unidimensional descendente. Esto podrá ocurrir no sólo en los estratos que tienen muy bajo valor de permeabilidad, sino también como una consecuencia de la permeabilidad relativa, cuando ésta es mucho más alta en el estrato superior que en el inferior.

Las características del perfil del suelo juegan un papel importante en la determinación del ancho y espaciamiento de los surcos. Según experiencias de campo, si se ubica el estrato poco permeable a determinada profundidad en el perfil, la velocidad inicial de infiltración dependerá del área mojada, pero una vez que comienza a desarrollarse la capa freática sobre el estrato limitante, el espaciamiento entre surcos deja de tener importancia.

• Características de humedad del suelo

Las características de humedad del suelo son un factor importante en la infiltración. Éste ha sido analizado teóricamente y probado bajo condiciones de laboratorio y de campo. La característica de retención de agua es ahora considerada como una característica física para cada tipo de suelo. Por lo tanto, el contenido de agua necesita ser incluido como uno de los parámetros en una prueba de infiltración.

El US Bureau of Reclamation Land Classification Handbook sugiere dos pruebas de infiltración: una con suelo seco y otra con suelo húmedo. Una buena aproximación es, indudablemente, realizar la prueba de infiltración cuando el suelo se encuentre aproximadamente en el contenido de humedad al cual se aplicará normalmente el riego; por ejemplo, uno que represente el 50% del total de humedad disponible. Esta regla es válida en especial para suelos pesados que se contraen y agrietan al secarse.

• Método de riego y manejo del agua

El método de riego afecta el ingreso de agua en el suelo, el espesor que representa el flujo o el agua estancada sobre la superficie del terreno, y la uniformidad de aplicación. En el riego por aspersión, el agua penetra en el suelo inmediatamente al llegar a la superficie del terreno. En el riego por gravedad, el agua corre sobre el terreno en espesores diversos a través de canales de diferente tamaño y forma, con diferente gradiente hidráulico, y por lo tanto, con diferente área efectiva para la infiltración.

Una diferencia importante entre los patrones de flujo de agua entre melgas y surcos es la que existe en relación al área mojada. En riego por melgas, prácticamente se cubre toda el área con una delgada lámina de agua, mientras que en riego por surcos se cubre parcialmente. Debido a que el área mojada es menor en el riego por surcos, la cantidad total infiltrada es también más pequeña que en riego por melgas.

Las condiciones hidráulicas que dependen del caudal, tamaño del surco, pendiente, forma y rugosidad de la superficie tienen un efecto sobre el perímetro mojado y sobre el área de entrada de agua. Por ello, la velocidad

de infiltración depende de las condiciones hidráulicas del surco. Una posible unión de los surcos adyacentes, debido al movimiento lateral del frente húmedo, puede en consecuencia, afectar también la velocidad de infiltración.

• Calidad del agua

Un problema en la infiltración relacionado con la calidad del agua ocurre cuando la velocidad de infiltración del agua de riego o de lluvia se reduce apreciablemente. Como consecuencia, el agua permanece sobre el suelo por un tiempo demasiado largo, o se infiltra muy lentamente y el cultivo no recibe el agua que necesita para producir cosechas aceptables.

Los factores de calidad del agua que suelen influir en la tasa de infiltración del suelo son el contenido total de sales (salinidad) y el contenido de sodio en relación a los contenidos del calcio y magnesio. Una alta salinidad aumenta la velocidad de infiltración, mientras que una baja salinidad o una proporción alta de sodio sobre el calcio la disminuye considerablemente.

Los problemas de infiltración ocasionados por la mala calidad del agua ocurren, por lo general, en los primeros centímetros del suelo; y están ligados con la estabilidad estructural del suelo y con el contenido de sodio en relación al calcio. Cuando los cultivos son regados con aguas con alto contenido de sodio, este elemento se acumula en las primeras capas del perfil del suelo, afectando totalmente su estructura.

Consecuentemente, los agregados de esta capa superficial se dispersan en partículas mucho más pequeñas que obturan los poros del suelo. Este problema también puede ser provocado por un contenido de calcio extremadamente bajo. En algunos casos, las aguas con bajo contenido de sales originan el mismo problema, pero más bien como resultado de su naturaleza corrosiva y no del contenido de sodio en el agua, o en el suelo. En el caso de aguas de bajo contenido de sales, los minerales solubles, incluyendo el calcio, son disueltos y trasladados a mayores profundidades.

• Otros factores

La temperatura influiría en la velocidad de infiltración, ya que la temperatura afecta la viscosidad y la tensión superficial del agua. El efecto de la temperatura en la infiltración no ha sido comprobado hasta ahora, pero se estima que es prácticamente reducido o minimizado.

Otro factor importante que debe tenerse en cuenta es el aire atrapado durante la inundación. El aire permanece en el espacio poroso del suelo, y no puede escapar bajo inundación extensiva. En el riego por surco, donde la superficie del terreno está parcialmente cubierta con agua, el aire atrapado es menos importante en la mayor parte de los suelos.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

Problema N°1

Con los datos de una prueba de avance en surcos, realizada con un caudal $Q = 96 \text{ l/min}$ en los campos de la Universidad Nacional Agraria, se desea obtener la ecuación de avance, $X = f(T_x)$, para “X” en m y “ T_x ” en min.

Solución:

Ecuación de avance, $X = f(T_x)$, para X en (m) y T_x en (min)

Datos:

De la prueba de avance se tiene:

X (m)	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
T_x (min)	3	8	13	18	23	30	36	42	50	60

Graficando estos datos en papel doble logarítmico se obtiene que:

$$p = 9.0 \quad y \quad m = 0.77$$

Luego, se obtendrá una ecuación de la siguiente forma:

$$X = pT_x^m$$

Reemplazando valores se obtendrá la siguiente ecuación de avance:

Rpta: $X = 9.0 * T_x^{0.77}$

Problema N° 2

Obtener analíticamente, por medio de las ecuaciones de regresión lineal, las funciones de avance correspondientes a pruebas realizadas con diferentes caudales, en los campos de la Universidad Nacional Agraria.

Solución:

Ecuación de avance, $X = f(t)$, para X en (m) y T_x en (min) para los cuatro tratamientos

Datos:

De la prueba de avance para los cuatro tratamientos se tiene:

Tiempos de avance (T_x), en min, para iguales incrementos de distancia (X)

X_i (m)	12.5	25.0	37.5	50.0	62.5	75.0	87.5	100.0	112.5	125.0	137.5	150.0	162.5	175.0
Tratamiento 1 $Q = 0.63 \text{ l/s}$	5.2	10.8	15.4	21.0	28.2	34.2	39.6	45.0	50.0	55.6	64.6	71.4	77.2	87.0
Tratamiento 2 $Q = 0.99 \text{ l/s}$	4.6	8.0	10.6	14.0	18.2	22.0	25.8	29.8	34.0	38.4	42.6	47.4	52.6	58.6
Tratamiento 3 $Q = 1.52 \text{ l/s}$	2.8	5.0	8.2	12.0	15.8	20.0	23.6	27.0	30.6	34.4	38.4	43.4	47.0	52.8
Tratamiento 4 $Q = 1.99 \text{ l/s}$	1.6	4.0	6.4	8.6	12.4	16.8	20.2	24.0	27.0	31.6	36.6	39.6	43.2	49.6

Según el método analítico, se tiene el siguiente procedimiento:

Dada la función:

$$X = pT_x^m$$

Linealizándola, se tiene: $\text{Log } X = \log p + m * \text{Log } T_x$

Que puede ser escrita de la forma: $Y = N + m * Z$

Expresión que corresponde a un modelo lineal típico, donde:

$$Y = \text{Log } X \quad ; \quad N = \text{Log } p \quad ; \quad Z = \text{Log } T_x$$

Aplicando la técnica de los mínimos cuadrados, se obtiene las ecuaciones que se presentan líneas abajo.

Luego: $p = \text{AntiLog } N$

- Con los parámetros **m** y **p**, se tiene definida la función de avance
- Con las ecuaciones expuestas y para los diferentes tratamientos se han obtenido los parámetros ‘**p**’, ‘**m**’ y **r²** siguientes:

Tratamientos ^(*)	p	m	r ²
Tratamiento 1 Q = 0.63 l/s	2.511	0.943	0.998
Tratamiento 2 Q = 0.99 l/s	3.090	1.010	0.991
Tratamiento 3 Q = 1.52 l/s	5.011	0.873	0.997
Tratamiento 4 Q = 1.99 l/s	7.943	0.766	0.998

(*) Los datos para cada tratamiento son el promedio de 5 repeticiones

Con los resultados obtenidos, se generaron las siguientes ecuaciones

Tratamiento 1

$$X = 2.511 * T_x^{0.943} \quad ; \quad r^2 = 0.998$$

Tratamiento 2

$$X = 3.090 * T_x^{1.010} \quad ; \quad r^2 = 0.991$$

Tratamiento 3

$$X = 5.011 * T_x^{0.873} \quad ; \quad r^2 = 0.997$$

Tratamiento 4

$$X = 7.943 * T_x^{0.766} \quad ; \quad r^2 = 0.998$$

Problema N° 3

Con los datos de la ecuación de avance obtenida en el problema N°1, determinar: la lámina infiltrada promedio I_{cum} en mm, cuando $X = 50$ m, $X = 100$ m, $X = 150$ m, $X = 200$ m respectivamente. Considerar el espaciamiento entre surcos igual a 0.70 m.

Solución:

La lámina infiltrada promedio I_{cum} en mm

Datos:

Caudal afluente, $Q = 96.0$ l/min

Espaciamiento entre surcos, $b = 0.70$ m

Si se conocen las siguientes relaciones:

- $L_x = 9.0 * T_x^{0.77}$ (ecuación obtenida en Problema 1)
- $I_{cum} = \frac{Q * T_x}{b * L_x}$

Aplicando para el caso de $L_x = 100$ m:

- Tiempo: Despejando T_x de la ecuación $L_x = 9.0 * T_x^{0.77}$

$$T_x = \left(\frac{L_x}{9.0} \right)^{\frac{1}{0.77}} = \left(\frac{100}{9.0} \right)^{\frac{1}{0.77}}$$

$$T_x = 22.81 \text{ min}$$

Reemplazando valores en la relación de I_{cum} :

$$\bullet \quad I_{cum} = \frac{Q * T_x}{b * L_x} = \frac{96 \frac{l}{min} * 22.81 \text{ min}}{0.70 \text{ m} * 100 \text{ m}} = \frac{96 \frac{l}{min} * \frac{1 m^3}{1,000 l} * 22.81 \text{ min}}{70 m^2} = 0.0312 \text{ m}$$

$I_{cum} = 31.28 \text{ mm}$

Siguiendo el mismo procedimiento, se determinan los valores de I_{cum} ; para $L_x = 50$ m, 150 m, y 200 m, los mismos que son los siguientes:

L_x (m)	T_x (min)	I_{cum} (mm)
50	9.27	25.4
100	22.81	31.3
150	38.62	35.3
200	56.11	38.5

Problema N° 4

Con los datos de cuatro pruebas de infiltración realizadas con cilindro infiltrómetro, en el Fundo Santa Rosita en Huaral y que se presentan en el cuadro siguiente, se pide determinar:

- Los parámetros de dichas ecuaciones
- Obtener la ecuación promedio de las cuatro pruebas anteriores.

Solución:

- Los parámetros de dichas ecuaciones expresadas como $I_{cum} = f(t)$ correspondiente a los cilindros infiltrómetros N°1, N°2, N°3 y N°4.**

Datos:

Ecuación para el análisis: $I_{cum} = AT_o^B$

El cálculo de los parámetros A y B se hace mediante la técnica de los mínimos cuadrados, para lo cual se utilizan las siguientes relaciones:

$$B = \frac{n(\sum X_i Y_i) - \sum X_i \sum Y_i}{n \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2}$$

Donde: $Y = \text{Log } I_{cum}$

$X = \text{Log } T_o$

El parámetro A, de la ecuación anterior, se calcula mediante la relación:

$$A_o = \frac{\sum y_i}{n} - \frac{B \sum x_i}{n}$$

Donde:

$$A = \text{antiLog} (A_o)$$

PRUEBA DE INFILTRACIÓN

Fundo: Santa Rosita

Fecha: 01-02-2003

Cilindros infiltrómetros							
1		2		3		4	
Tiempo acumulado (T _o , min)	Infiltración acumulada (I _{cum} , mm)	Tiempo acumulado (T _o , min)	Infiltración acumulada (I _{cum} , mm)	Tiempo acumulado (T _o , min)	Infiltración acumulada (I _{cum} , mm)	Tiempo acumulado (T _o , min)	Infiltración acumulada (I _{cum} , mm)
2	5	2	3	2	2	2	3
4	7	4	7	4	4	4	4
6	9	6	9	6	5	6	5
8	10	8	11	8	6	8	7
10	12	10	14	10	9	10	9
15	15	15	17	15	10	15	13
20	18	20	20	20	12	20	14
25	21	25	23	25	14	25	16
30	22	30	25	30	15	30	18
35	24	35	27	35	16	35	20
40	25	40	30	40	17	40	22
45	27	45	33	45	18	45	24
50	28	50	35	50	19	50	25
55	29	55	36	55	20	55	27
60	29	60	38	60	21	60	28
75	31	75	44	75	23	75	33
90	31	90	49	90	24	90	35
105	35	105	53	105	25	105	38
120	37	120	57	120	27	120	40
135	38	135	61	135	28	135	42
150	39	150	66	150	29	150	44
165	40	165	69	165	30	165	46

Aplicando las relaciones anteriormente expuestas a las cuatro pruebas de infiltración, se obtienen las siguientes ecuaciones:

Cilindro infiltrómetro N°	Ecuaciones Halladas (*)
1	$I_{cum} = 3.98T_o^{0.48}$
2	$I_{cum} = 1.86T_o^{0.65}$
3	$I_{cum} = 2.51T_o^{0.65}$
4	$I_{cum} = 1.58T_o^{0.57}$

(*) Para I_{cum} en mm y T_o en min

b) Obtención de la ecuación promedio:

Para obtener la ecuación promedio de los cilindros infiltrómetros N°1, N°2, N°3 y N°4, se calculan los valores promedio aritméticos de los parámetros A y B.

Datos:

Valores del parámetro "A" serán: 3.98, 1.58, 1.86, 2.51

Valores del parámetro "B" serán: 0.48, 0.57, 0.65, 0.65

El promedio aritmético será:

$$A = \frac{3.98 + 1.58 + 1.86 + 2.51}{4} = 2.48$$

$$B = \frac{0.48 + 0.57 + 0.65 + 0.65}{4} = 0.587 \cong 0.59$$

La ecuación será de la siguiente forma: $I_{cum} = AT_o^B$

Reemplazando valores se obtiene la ecuación promedio: $I_{cum} = 2.48 * T_o^{0.59}$

Problema N°5

Con la ecuación promedio obtenida en el problema anterior, deducir la ecuación de la velocidad de infiltración, $i = f(t_o)$

Solución:

Ecuación de la forma $i = f(t_o)$

Datos:

La ecuación buscada es de la forma: $i = aT_o^b$

Sin embargo, se obtuvo en el problema anterior la ecuación promedio de la forma:

$$I_{cum} = A * T_o^B = 2.48 * T_o^{0.59}$$

Que escrita de otra forma es:

$$2.48 = \frac{a}{b+1} \quad \text{y} \quad 0.59 = b+1$$

Igualando parámetros, se tiene que:

$$a = 1.46 \quad ; \quad b = -0.41$$

Reemplazando en: $i = aT_o^b$ se obtiene la ecuación:

$$i = 1.46T_o^{-0.41}$$

Parta esta ecuación ; $i = 1.46 * T_o^{-0.41}$; i tiene unidades de mm/min y T_o tiene unidades en min. Si se desea expresar la ecuación hallada en mm/hora entonces se procede de la siguiente forma:

$$i = 1.46 * T_o^{-0.41} \frac{\text{mm}}{\text{min}}$$

$$i = 1.46 * T_o^{-0.41} \frac{\text{mm}}{\text{min}} * \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ hora}}$$

$$i = 87.6 * T_o^{-0.41} \frac{\text{mm}}{\text{hora}}$$

Para esta ecuación ; $i = 87.6 T_o^{-0.41}$; i tiene unidades de mm/hora y T_o tiene unidades en min.

Problema N°6

Obtener, en base a la ecuación del problema N°5, el valor o magnitud de la infiltración básica i_b , y el tiempo T_b al cual se la obtiene.

Solución:

$$i_b = 87.6 * [-600 * (-0.41)]^{-0.41} = 8.1 \text{ mm/hora}$$

Infiltración básica i_b , y el tiempo T_b

Datos:

- $i = 87.6 T_o^{-0.41}$; i
- Tiempo (T_b) se obtiene así:
 $T_b = -600 * b$ en minutos
- Velocidad de Infiltración básica i_b , donde $i_b = a T_o^b$
 $i_b = a(-600 * b)^b$, para T_b en minutos
- Si $a = 87.6$; $b = -0.41$

Reemplazando valores, se obtiene:

$$\text{Tiempo } (T_b): T_b = -600 * (-0.41) = 246 \text{ min}$$

Luego, la velocidad de Infiltración básica (i_b):

Problema N°7

Con la ecuación obtenida en el problema N°4, calcular la lámina infiltrada en el lapso de tiempo comprendido entre $T_1 = 50$ min y $T_2 = 100$ min

Solución:

Lámina infiltrada entre $T_1 = 50$ min y $T_2 = 100$ min.

Datos:

$$I_{\text{cum}} = 2.48 * T_0^{0.59}$$

$$T_1 = 50 \text{ min} \quad \text{y} \quad T_2 = 100 \text{ min}$$

$$\text{Si se tiene: } I_{\text{cum}2} = 2.48 * T_2^{0.59} \quad \text{y} \quad I_{\text{cum}1} = 2.48 * T_1^{0.59}$$

Luego la lámina infiltrada para los diferentes tiempos será:

Reemplazando valores

$$\Delta I_{\text{cum}} = (I_{\text{cum}2} - I_{\text{cum}1})$$

$$\Delta I_{\text{cum}} = 2.48 * T_2^{0.59} - 2.48 * T_1^{0.59}$$

$$\Delta I_{\text{cum}} = 2.48 * (T_2^{0.59} - T_1^{0.59})$$

$$\Delta I_{\text{cum}} = 2.48 * (100^{0.59} - 50^{0.59})$$

$$\Delta I_{\text{cum}} = 2.48 * (15.14 - 10.06)$$

$$\Delta I_{\text{cum}} = 12.6 \text{ mm}$$

Por lo tanto, la lámina infiltrada buscada para dicho rango de tiempo será:

Rpta:

$I_{\text{cum}} = 12.6 \text{ mm}$

CAPÍTULO IV

NECESIDADES DE AGUA EN LOS CULTIVOS

Un aspecto fundamental en la ingeniería de riego es lo referente a la cuantificación del consumo de agua o necesidades de agua de los cultivos. Éste es un elemento básico que se utiliza para dimensionar las obras de infraestructura de riego, así como planificar y programar el riego de los cultivos a nivel parcelario.

La determinación del consumo de agua de los cultivos llamada evapotranspiración real se efectúa mediante la utilización de diferentes métodos. La mayoría de ellos utiliza variables climáticas como: evaporación de tanque clase “A”, temperatura, humedad relativa, radiación solar, entre otros.

La determinación del consumo de agua de un cultivo por los diversos métodos que se mencionan en este capítulo es una primera aproximación para satisfacer los propósitos que se han mencionado. El criterio para la asignación del agua de riego puede ser mejorado mediante el conocimiento de la función de producción y el valor económico del agua. Esto quiere decir que hay un requerimiento de agua técnico-fisiológico y un requerimiento de agua económico; no existe un determinado consumo de agua fijo.

4.1 Conceptos básicos

4.1.1 Evaporación

Es el proceso físico mediante el cual el agua pasa del estado líquido a vapor. La evaporación constituye una de las fases del ciclo hidrológico, y está influenciada por diversos factores. Entre los cuales, se tienen al: viento, temperatura, humedad relativa, radiación, composición y color del suelo, entre otros.

En el caso de los cultivos, cuando se habla de evaporación, nos estamos refiriendo a la evaporación del agua que se encuentra en el suelo.

4.1.2 Transpiración

Es el fenómeno físico por el cual el agua en estado de vapor se mueve desde el mesófilo de la planta hacia la atmósfera. Es decir, el flujo de agua de la planta a la atmósfera ocurre a través de los estomas y de las otras células epidérmicas, a través de la cutícula de la planta. Puede considerarse como una pérdida de agua de los tejidos de las plantas, pero no es estrictamente así, puesto que también desempeña una función refrigerante de las plantas. Los estomas si bien son el principal medio de salida del agua de la planta al exterior también sirven para la entrada de CO_2 y la salida del O_2 .

La magnitud de pérdida de agua por transpiración es muy elevada. Así, una planta de maíz pierde unos 200 kg de agua durante todo su período vegetativo o un equivalente promedio de 1.5 a 2 kg de agua por día; mientras que un cactus en ese mismo período pierde tan sólo 25 gramos. En general, se estima que un terreno sin vegetación pierde 3 veces más vapor de agua que un terreno con vegetación.

El fenómeno de la transpiración tiene dos etapas:

- Evaporación del agua desde las paredes de las células del mesófilo a los espacios aéreos del mesófilo.
- Difusión del vapor de agua desde los espacios aéreos y del interior de la planta hacia el exterior, principalmente a través de los estomas. A la vez, los estomas son la vía de entrada de CO_2 que se utiliza en la

fotosíntesis y, en general, la vía mayoritaria de intercambio gaseoso de la planta.

Naturalmente, el agua que la hoja pierde por transpiración es repuesta rápidamente a través de la corriente de agua que asciende por el xilema. El potencial hídrico del agua en estado de vapor (Ψ_v) en la atmósfera, se puede expresar por la fórmula:

$$\Psi_v = 135 * MP_a * \ln \left(\frac{HR}{100\%} \right) \dots\dots\dots (1)$$

Donde: HR = humedad relativa (%); 1 MP_a = 1 megapascal = 10 bars = 9.87 atm.

Como (HR/100 %) no puede superar el valor de 1, su logaritmo natural (ln) es en general negativo. Así por ejemplo:

$$HR = 100\% \rightarrow \Psi_v = 0 \text{ bars}$$

$$HR = 99\% \rightarrow \Psi_v = -13.57 \text{ MPa} = -13.57 \text{ bars}$$

$$HR = 98\% \rightarrow \Psi_v = -27.274 \text{ MPa} = -27.274 \text{ bars}$$

$$HR = 95\% \rightarrow \Psi_v = -68 \text{ MPa} = -27.274 \text{ bars}$$

$$HR = 90\% \rightarrow \Psi_v = -142.237 \text{ MPa} = -27.274 \text{ bars}$$

Los valores del potencial en los tejidos del mesófilo de las plantas (Ψ) varían entre -0.2 y -1.5 MPa que son valores que corresponden a dos situaciones: de óptima disponibilidad de agua y a un déficit cercano al punto de marchitez, respectivamente.

Analizando el potencial hídrico del agua en estado de vapor (Ψ_v) de la atmósfera y comparándolo con el potencial del mesófilo y de las partes foliares de una planta, se puede afirmar que continuamente el agua de la planta tiende a perderse debido al diferencial de potencial entre ambos (atmósfera-planta) salvo, sólo cuando la HR = 100%, en que el flujo puede inclusive invertirse.

Atmósfera	Planta
* HR = 100% → $\Psi_v = 0$ bars	$\Psi_p = -0.2$ a -1.5 MPa = -2.0 a -15 bars
** HR = 99% → $\Psi_v = -13.57$ MPa = -13.57 bars	$\Psi_p = -0.2$ a -1.5 MPa
** HR = 98% → $\Psi_v = -6.8$ MPa = -27.274 bars	$\Psi_p = -0.2$ a -1.5 MPa
** HR = 90% → $\Psi_v = -142.237$ MPa = -27.274 bars	$\Psi_p = -0.2$ a -1.5 MPa

* Aquí como $\Psi_v > \Psi_p$; el flujo de agua se daría de la atmósfera hacia la planta.

** Para HR menores de 99%, el $\Psi_v < \Psi_p$; entonces el flujo de agua será de la planta hacia la atmósfera.

Entonces, el movimiento del agua en el medio planta-atmósfera se da cuando se cumple la condición:

$$\Psi_{\text{planta}} > \Psi_{\text{atmósfera}}$$

Según esta relación, no ocurrirá movimiento del agua de la planta hacia la atmósfera cuando la HR = 100% o un valor muy cercano a éste. En el resto de casos, siempre ocurrirá un flujo de agua de la planta hacia la atmósfera.

La transpiración, mediante la descarga de parte de la energía recibida, contribuye al balance térmico de la hoja. Si esa energía no se gastara o no se liberase de esa manera, se produciría un aumento de la temperatura de la hoja a un nivel indeseable en la mayoría de los procesos metabólicos y enzimáticos de las plantas.

La transpiración es, además, el fenómeno que origina la gradiente de tensión del agua en el xilema y el consecuente ascenso del agua de las partes más bajas de la planta, posibilitando así la distribución del agua en toda la planta y las demás sustancias disueltas en ella, como son los nutrientes que se absorben del suelo. El único medio que dispone una planta para conservar el agua en el interior de sus células es mediante la disminución de la transpiración que se logra mediante el cierre de sus estomas. El cierre comienza a producirse al perder la planta el 5% de sus reservas de agua, y se cierra totalmente cuando dichas pérdidas llegan al 15%.

La absorción de agua por la planta no es un fenómeno físico separado de la transpiración; pues permite a la planta obtener en el suelo el agua que necesita para dicha transpiración. La disminución de la fotosíntesis provoca la consiguiente disminución de la transpiración y consecuentemente la disminución de la absorción de agua por la planta.

4.1.3 Evapotranspiración

Es el proceso de flujo de agua hacia la atmósfera proveniente de la evaporación del agua del suelo y de la transpiración de las plantas. Es complejo y depende no sólo de los elementos físicos (climáticos) que afectan la evaporación, sino también de las características morfológicas y fisiológicas de la cobertura vegetal, del suelo y de su nivel de humedad. La evapotranspiración es un proceso combinado de evaporación y transpiración. En el periodo vegetativo de un cultivo, hay etapas críticas durante las cuales las plantas son exigentes en agua o por el contrario, según la fisiología de cada cultivo, requieren de un stress o déficit de agua para lograr el óptimo rendimiento y calidad de los productos en la cosecha.

4.1.4 Evapotranspiración potencial (ETP)

La evapotranspiración potencial (ETP) es aquella que se produce en un cultivo de tamaño corto (generalmente pastos) que cubre toda la superficie del suelo, en estado activo de crecimiento y con un suministro adecuado y continuo del agua.

El comité técnico sobre requerimientos de riego de la Sociedad Americana de Ingeniería Civil (ASCE) ha utilizado a la alfalfa como pasto standard para el cálculo de la evapotranspiración potencial. Por el contrario, algunos investigadores de la ciencia del riego han empleado otro tipo de pasto.

4.1.5 Evapotranspiración máxima (ET_m)

Es el máximo consumo de agua que ocurre en un momento determinado del ciclo vegetativo de un cultivo, bajo condiciones de óptima humedad del suelo, sanidad, entre otros factores.

4.1.6 Evapotranspiración real o actual (ETA)

La evapotranspiración real o actual es la que se produce cualquiera que sean las condiciones de las plantas y del suelo. Se la define también como la tasa real de consumo de agua de un cultivo. Entre los factores que afectan o definen la evapotranspiración real o uso consuntivo de agua de un cultivo, están los mismos que afectan a la evaporación del agua del suelo y a la transpiración de las plantas, tales como:

- Elementos climáticos;
- Especie vegetal o cultivo y sus características genéticas;
- Nivel de humedad del suelo;
- Características físicas y químicas del suelo;
- Sanidad y vigorosidad del cultivo; y
- La fase vegetativa del cultivo.

La evapotranspiración actual o real puede calcularse mediante la relación:

$$ETA = K_c * K_s * K_h * ETP \quad \dots\dots\dots (2)$$

Dónde:

- K_c : Factor de cultivo;
 K_h : Factor de Humedad;
 K_s : Factor suelo; y
 ETP : Evapotranspiración potencial.

4.1.7 Factor de cultivo (K_c)

Es el factor que indica el grado de desarrollo de las plantas o cobertura del suelo por el cultivo.

4.2 Evapotranspiración potencial (ETP)

El principio en el que se basa el método indirecto para obtener la evapotranspiración real de los cultivos a partir de la evapotranspiración potencial consiste en considerar que si dentro de un mismo ambiente se mide simultáneamente la evapotranspiración tanto del pasto de referencia como del cultivo, durante un determinado periodo de tiempo, entonces

existiría una relación entre ambos valores de la evapotranspiración, cuya cuantificación estará dada por un factor de proporcionalidad al que se le denomina coeficiente de cultivo o factor de cultivo. Como es de suponer, este coeficiente tendrá valores distintos de acuerdo al cultivo de referencia que se utilice. Por ejemplo, si se está empleando la alfalfa como pasto de referencia y al maíz como el cultivo, en la relación de evapotranspiración, entonces se obtiene un determinado valor del coeficiente de cultivo que será diferente si se hubiese relacionado al mismo con otro pasto (ejemplo, ray grass).

Según experiencias en trabajos realizados en zonas alto andinas del Perú, se ha podido apreciar que la temperatura, el viento y la humedad relativa no varían mucho de un día para otro. Por este motivo, los valores referenciales para ETP son:

ZONAS	Evapotranspiración potencial (ETP)
Valles (de 1,000 a 2,000 msm)	4.0 mm / día
Zonas Quechua (de 2,000 a 3,000 msm)	3.0 mm / día
La Jalca (de 3,000 msm o más)	2.5 mm / día

Fuente: PRONAMACHCS, 1998

Para zonas intermedias, se interpola entre estos valores. Ejemplo: un área de riego que está a 2,500 msnm, justo entre las zonas de Valle y Quechua, tendría un valor ETP de aproximadamente 3.5 mm/día.

Las diferencias en ETP, según las zonas, se deben especialmente a las diferencias de temperatura entre zonas más bajas y las alturas.

Otra fuente de importancia respecto a la evapotranspiración del cultivo de referencia (en mm/día) para distintas regiones agroclimáticas. Según la FAO, son las siguientes:

Cuadro N°1.- Tasa de evapotranspiración a diferentes condiciones climáticas (mm/día)

REGIONES	Temperatura media diurna °C		
	Fría t < 10°C	Moderada t 20°C	Cálida t > 30 °C
1.1 TROPICAL			
Húmeda	3 – 4	4 – 5	5 – 6
Subhúmeda	3 – 5	5 – 6	7 – 8
Semiárida	4 – 5	6 – 7	8 – 9
Árida	4 – 5	7 – 8	9 – 10
1.2 SUBTROPICAL			
Lluvia de verano:			
Húmeda	3 – 4	4 – 5	5 – 6
Subhúmeda	3 – 5	5 – 6	6 – 7
Semiárida	4 – 5	6 – 7	7 – 8
Árida	4 – 5	7 – 8	10 – 11
<i>Lluvia de Invierno:</i>			
Húmeda – Subhúmeda	2 – 3	4 – 5	5 – 6
Semiárida	3 – 4	5 – 6	7 – 8
Árida	4 – 5	6 – 7	10 – 11
1.3 TEMPLADA			
Húmeda – Subhúmeda	2 – 3	3 – 4	5 – 7
Semiárida- Árida	3 – 4	5 – 6	8 – 9

Fuente: FAO. 1980

Métodos para determinar la evapotranspiración potencial (ETP)

Existen varios métodos para determinar la evapotranspiración potencial. Los más comunes son los siguientes:

- Por muestreo de humedad del suelo;
- Lisímetro;
- Tanque de evaporación;
- Balance de agua;
- Balance de energía; y
- Métodos o fórmulas empíricas.

De todos estos métodos, los que tienen mayor aplicación práctica son los métodos empíricos, lisímetros y el tanque clase “A”.

a) Métodos directos para la determinación de la ETP

Como métodos directos para medir la ETP, se consideran a los lisímetros, el tanque de evaporación tipo “A” y a los muestreos de suelo para determinación del contenido de humedad.

El primero es el más exacto, porque hace involucrar al cultivo de referencia. El segundo responde a las propias variables climáticas (radiación solar, temperatura, velocidad del viento y humedad relativa) por lo que una estimación a partir de este método, a falta de mayor información, es la más adecuada y el método del muestreo se puede utilizar con relativa precisión, dependiendo del cuidado en el muestreo.

a.1) Método de lisímetro

El método de lisímetro es la forma directa y exacta de medir la evapotranspiración potencial, a partir de un aparato o estructura llamado lisímetro, durante un periodo determinado.

En el interior del lisímetro, se encuentra el cultivo patrón o pasto que es materia de análisis de la cantidad de agua evaporada o transpirada. Este método generalmente se usa en trabajos de investigación, y es poco empleado en estudios de requerimiento de agua de los cultivos de proyectos de irrigación en marcha.

Entre los diferentes tipos de lisímetros, se tienen los siguientes:

- El lisímetro de balance indica que la capacidad de almacenamiento de la humedad del suelo permanece constante, y donde el uso del agua por el cultivo, es la diferencia entre el agua aplicada y la drenada.
- El lisímetro de pesada consiste en determinar el peso del consumo de agua por el cultivo. Se determina por la pérdida de peso entre las aplicaciones de agua.

La determinación de la evapotranspiración potencial mediante un lisímetro se hace mediante la siguiente relación:

$$\boxed{ETP = D_a - D_d} \dots\dots\dots (3)$$

Dónde:

ETP : Evapotranspiración potencial (mm)

D_a : Cantidad de agua aplicada (mm), y

D_d : Cantidad de agua drenada (mm).

Mediante este método, también puede determinarse la evapotranspiración real y potencial de los cultivos de interés.

a.2) Método de tanque de evaporación clase “A”

Este método consiste en encontrar una relación entre la tasa de evapotranspiración producida en un lisímetro y la tasa de evaporación producida en un tanque de evaporación clase “A”, que mide 1.20 m de diámetro, 0.25 m de profundidad, y se instala a 0.15 m por sobre el nivel de terreno.

Generalmente, es mayor la evaporación directa de una superficie de agua que la de un cultivo, por muy húmedo que se encuentre el suelo. Es decir, la evapotranspiración de un cultivo de referencia como el de la alfalfa o el pasto es una fracción de la evaporación observada en el tanque clase “A”; a esta fracción o factor se le denominada “coeficiente de tanque” (F_t). Ver cuadro N°2, según la FAO (1976), la evapotranspiración potencial (ETP) se estima de la siguiente manera:

$$\boxed{ETP = F_t * E_o} \dots\dots\dots (4)$$

Donde:

ETP = Evapotranspiración potencial, (mm/día),

E_o = Evaporación libre de tanque clase “A”, (mm/día), y

F_t = Coeficiente empírico, válido para las condiciones ambientales del tanque.



Tanque de evaporación Clase "A"

La evaporación (E_o) se lee directamente del tanque. El coeficiente (F_t) se obtiene del Cuadro N°2. Este método es altamente eficiente y preciso, siempre que se cumpla con todas las condiciones que se requiere para su instalación y uso. Además, es un método sumamente práctico.

a.3) Método del muestreo de humedad del suelo

Este método consiste en tomar muestras de suelo de un campo con el cultivo de referencia en intervalos de tiempos distintos después del riego, que puede ser 1, 2 ó 3 días como máximo a fin de buscar que tenga el suelo la máxima cantidad de agua disponible, según sus características físicas. Inmediatamente después, dichas muestras son llevadas al laboratorio para determinar su contenido de humedad correspondiente. Basado en dichos datos, se determina la evapotranspiración potencial del cultivo, mediante la expresión:

$$ETP = \frac{(\theta_0 - \theta_1) * Prof}{(t_1 - t_0) * 100 \%} \dots\dots\dots (5)$$

Dónde:

θ_0 : Contenido de humedad inicial, $t_0 = 0$ (Vol. %),

θ_1 : Contenido de humedad para, $t_1 = t_{final}$ (Vol %),

Prof : Profundidad de la capa enraizada de suelo (mm),

t_0 : Tiempo inicial, ($t_0 = 0$); (días),

t_1 : Tiempo final, ($t_1 = t_{final}$); (días), y

ETP : Evapotranspiración potencial del cultivo de referencia (mm/día)

Cuadro N°2.- Valores de F_t (coeficiente de tanque) para evaporaciones medidas en un tanque evaporímetro bajo diferentes condiciones (Doorembos y Pruitt, 1990).

Viento (Km/d)	Radio de cultivo (m)	CASO A: Tanque situado sobre pasto o cultivo			Radio de suelo desnudo (m)	CASO B: Tanque situado en suelo desnudo		
		Humedad relativa media (%)				Humedad relativa media (%)		
		Bajo <40	Medio 40-70	Alto >70		Bajo <40	Medio 40-70	Alto >70
Ligero <175 Km/d (<12m/s)	0	0.55	0.65	0.75	0	0.70	0.80	0.85
	10	0.65	0.75	0.85	10	0.60	0.70	0.80
	100	0.70	0.80	0.85	100	0.55	0.65	0.75
	1,000	0.75	0.85	0.85	1,000	0.50	0.60	0.70
Moderado 175-425 km/d (2-5 m/s)	0	0.50	0.60	0.65	0	0.65	0.75	0.80
	10	0.60	0.70	0.75	10	0.55	0.65	0.70
	100	0.65	0.75	0.80	100	0.50	0.60	0.65
	1,000	0.70	0.80	0.80	1,000	0.45	0.55	0.60
Fuerte 425-700 Km/d (5-8 m/s)	0	0.45	0.50	0.60	0	0.60	0.65	0.70
	10	0.55	0.60	0.65	10	0.50	0.55	0.65
	100	0.60	0.65	0.70	100	0.45	0.50	0.60
	1,000	0.65	0.70	0.75	1,000	0.40	0.45	0.55
Muy fuerte >700 km/d (>8 m/s)	0	0.40	0.45	0.50	0	0.50	0.60	0.65
	10	0.45	0.55	0.60	10	0.45	0.50	0.55
	100	0.50	0.60	0.65	100	0.40	0.45	0.50
	1,000	0.55	0.60	0.65	1,000	0.35	0.40	0.45

Este método es muy práctico y recomendable para ser utilizado en la determinación de la evapotranspiración potencial y real del cultivo de interés, pues toma en cuenta las características reales del suelo, clima, cultivo y manejo o factor humano.

b) Métodos indirectos para la determinación de la ETP

Las fórmulas empíricas están consideradas como métodos indirectos y consisten en fórmulas o ecuaciones deducidas por diversos investigadores. Están basadas en la aplicación de variables meteorológicas como factores

que afectan la tasa de la evapotranspiración potencial. Además, han sido desarrolladas para zonas con características propias.

Las fórmulas o métodos empíricos más conocidos y de mayor aplicación son:

- Método de Hargreaves
- Método de Penman Modificado
- Método de Blaney – Criddle
- Método de Radiación
- Método de Christiansen
- Método de Jensen – Haise

A continuación, se describe la aplicación del método de Hargreaves y Penman modificado.

b.1) Método de Hargreaves

Los datos climáticos necesarios para la aplicación de este método son la temperatura media mensual, radiación solar medida y calculada, radiación extraterrestre equivalente, factor mensual de latitud, humedad relativa y la altitud.

Los cálculos de la evapotranspiración potencial pueden ser en base a la radiación y temperatura.

1. En base a la radiación

Existen 2 fórmulas:

- **En base a datos registrados de radiación solar**

La ecuación es la siguiente:

$$\text{ETP} = 0.004 \cdot \text{TMF} \cdot \text{RS}$$

..... (6)

Dónde:

ETP : Evapotranspiración potencial (mm/mes),

RS : Radiación solar media mensual (cal/cm²/día), medida, y

TMF : Temperatura media mensual en grados Fahrenheit (°F), medida

$$\boxed{\text{TMF} = \frac{9}{5} * T_{\text{media}}(^{\circ}\text{C}) + 32} \quad \dots\dots\dots (7)$$

Ejemplo:

Calcular la ETP, para Huancayo y para el mes de setiembre, mediante la ecuación anterior:

$$T_{\text{media}} = 11.4^{\circ}\text{C}$$

$$\text{RS} = 525 \text{ cal/cm}^2/\text{día}$$

Solución:

$$\text{TMF} = \frac{9}{5} * T_{\text{media}}(^{\circ}\text{C}) + 32$$

$$\text{TMF} = \frac{9}{5} * 11.4 + 32$$

$$\text{TMF} = 52.5^{\circ}\text{F}$$

Reemplazando valores en la ecuación (6) se tiene:

$$\text{ETP} = 0.004 * \text{TMF} * \text{RS}$$

$$\text{ETP} = 0.004 * 52.5 * 525$$

$$\text{ETP} = 110.2 \text{ mm/mes}$$

$$\text{ETP} = 3.7 \text{ mm/día}$$

- **En base a datos de radiación solar equivalente**

Las fórmulas usadas son:

$$\boxed{\text{ETP} = 0.0075 * \text{RSM} * \text{TMF}} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\boxed{\text{RSM} = 0.075 * \text{RMM} * \text{S}^{0.5}} \quad \dots\dots\dots (9)$$

Dónde:

ETP : Evapotranspiración potencial (mm/mes)

RSM : Radiación solar equivalente en mm de evaporación mensual (mm/mes)

TMF : Temperatura media mensual (°F), medida

$$\text{TMF} = \frac{9}{5} * \text{T}_{\text{media}}(^{\circ}\text{C}) + 32$$

RMM : Radiación extraterrestre equivalente en mm de evaporación mensual, (mm/mes)

$$\boxed{\text{RMM} = \text{Ra} * \text{DM}} \quad \dots\dots\dots (10)$$

Ra : Radiación extraterrestre equivalente en mm de evaporación diaria (mm/día); se obtiene del Cuadro N°3,

DM : Número de días del mes que se analiza, y

S : Porcentaje de horas de insolación (%).

$$\boxed{\text{S} = \frac{\text{n}}{\text{N}} * 100} \quad \dots\dots\dots (11)$$

n : Horas de insolación fuerte promedio del lugar, medida,

N : Horas de insolación fuerte, según mes y latitud del lugar; se obtiene del Cuadro N°4.

Ejemplo:

Calcular la ETP, para Huancayo y para el mes de Setiembre, mediante la ecuación (8)

Datos

TMF = 52.5 °F

Latitud = 12° 02'

n = 6.5 horas/día

DM = 30 días

Solución:

Del Cuadro N°3 se obtiene: $RMM = Ra * DM$

$$Ra = 14.7 \text{ mm/día} \quad \text{—} \quad RMM = 14.7 * 30 = 441 \text{ mm/mes}$$

Del Cuadro N°4: $N = 12 \text{ horas/día}$

Calculando S:

$$S = \frac{n}{N} * 100$$

$$S = \frac{6.5}{12} * 100$$

S = 54

Luego: $RSM = 0.075 * RMM * S^{0.5}$

$$RSM = 0.075 * 441 * (54)^{0.5}$$

$$RSM = 243 \text{ mm / mes}$$

En consecuencia:

$$ETP = 0.0075 * RSM * TMF$$

$$ETP = 0.0075 * 243 * 52.5 = 95.7 \text{ mm/mes}$$

ETP = 3.2 mm/día

Cuadro N°3.- La radiación extraterrestre (Ra) expresada en equivalente de evaporación (mm/día)

Hemisferio Norte												Lat	Hemisferio Sur											
Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
3.8	6.1	9.4	12.7	15.8	17.1	16.4	14.1	10.9	7.4	4.5	3.2	50°	17.5	14.7	10.9	7.0	4.2	3.1	3.5	5.5	8.9	12.9	16.5	18.2
4.3	6.6	9.8	13.0	15.9	17.2	16.5	14.3	11.2	7.8	5.0	3.7	48°	17.6	14.9	11.2	7.5	4.7	3.5	4.0	6.0	9.3	13.2	16.6	18.2
4.9	7.1	10.2	13.3	16.0	17.2	16.6	14.5	11.5	8.3	5.5	4.3	46°	17.7	15.1	11.5	7.9	5.2	4.0	4.4	6.5	9.7	13.4	16.7	18.3
5.3	7.6	10.6	13.7	16.1	17.2	16.6	14.7	11.9	8.7	6.0	4.7	44°	17.8	15.3	11.9	8.4	5.7	4.4	4.9	6.9	10.2	13.7	16.7	18.3
5.9	8.1	11.0	14.0	16.2	17.3	16.7	15.0	12.2	9.1	6.5	5.2	42°	17.8	15.5	12.2	8.8	6.1	4.9	5.4	7.4	10.6	14.0	16.8	18.3
6.4	8.6	11.4	14.3	16.4	17.3	16.7	15.2	12.5	9.6	7.0	5.7	40°	17.9	15.7	12.5	9.2	6.6	5.3	5.9	7.9	11.0	14.2	16.9	18.3
6.9	9.0	11.8	14.5	16.4	17.2	16.7	15.3	12.8	10.0	7.5	6.1	38°	17.9	15.8	12.8	9.6	7.1	5.8	6.3	8.3	11.4	14.4	17.0	18.3
7.4	9.4	12.1	14.7	16.4	17.2	16.7	15.4	13.1	10.6	8.0	6.6	36°	17.9	16.0	13.2	10.1	7.5	6.3	6.6	8.8	11.7	14.6	17.0	18.2
7.9	9.8	12.4	14.8	16.4	17.1	16.8	15.5	13.4	10.8	8.5	7.2	34°	17.8	16.1	13.5	10.5	8.0	6.8	7.2	9.2	12.0	14.9	17.1	18.2
8.3	10.2	12.8	15.0	16.5	17.0	16.8	15.6	13.6	11.2	9.0	7.8	32°	17.8	16.2	13.8	10.9	8.5	7.3	7.7	9.6	12.4	15.1	17.2	18.1
8.8	10.7	13.1	15.2	16.5	17.0	16.6	15.7	13.9	11.6	9.5	8.3	30°	17.8	16.4	14.0	11.3	8.9	7.8	8.1	10.1	12.7	15.3	17.3	18.1
9.3	11.1	13.4	15.3	16.5	16.8	16.7	15.7	14.1	12.0	9.9	8.8	28°	17.7	16.4	14.3	11.6	9.3	8.2	8.6	10.4	13.0	15.4	17.2	17.9
9.8	11.5	13.7	15.3	16.4	16.7	16.6	15.7	14.3	12.3	10.3	9.3	26°	17.6	16.4	14.4	12.0	9.7	8.7	9.1	10.9	13.2	15.5	17.2	17.8
10.2	11.9	13.9	15.4	16.4	16.6	16.5	15.8	14.5	12.6	10.7	9.7	24°	17.5	16.5	14.6	12.3	10.2	9.1	9.5	11.2	13.4	15.6	17.1	17.7
10.7	12.3	14.2	15.5	16.3	16.4	16.4	15.8	14.6	13.0	11.1	10.2	22°	17.4	16.5	14.8	12.6	10.6	9.6	10.0	11.6	13.7	15.7	17.0	17.5
11.2	12.7	14.4	15.6	16.3	16.4	16.3	15.9	14.8	13.3	11.6	10.7	20°	17.3	16.5	15.0	13.0	11.0	10.0	10.4	2.0	13.9	15.8	17.0	17.4
11.6	13.0	14.6	15.6	16.1	16.1	16.1	15.8	14.9	13.6	12.0	11.1	18°	17.1	16.5	15.1	13.2	11.4	10.4	10.8	12.3	14.1	15.8	16.8	17.1
12.0	13.3	14.7	15.6	16.0	15.9	15.9	15.7	15.0	13.9	12.4	11.6	16°	16.9	16.4	15.2	13.5	11.7	10.8	11.2	12.6	14.3	15.8	16.7	16.8
12.4	13.6	14.9	15.7	15.8	15.7	15.7	15.7	15.1	14.1	12.8	12.0	14°	16.7	16.4	15.3	13.7	12.1	11.2	11.6	12.9	14.5	15.8	16.5	16.6
12.8	13.9	15.1	15.7	15.7	15.5	15.5	15.6	15.2	14.4	13.3	12.5	12°	16.6	16.3	15.4	14.0	12.5	11.6	12.0	13.2	14.7	15.8	16.4	16.5
13.2	14.2	15.3	15.7	15.5	15.3	15.3	15.5	15.3	14.7	13.6	12.9	10°	16.4	16.3	15.5	14.2	12.8	12.0	12.4	13.5	14.8	15.9	16.2	16.2
13.6	14.5	15.3	15.6	15.3	15.0	15.1	15.4	15.3	14.8	13.9	13.3	8°	16.1	16.1	15.5	14.4	13.1	12.4	12.7	13.7	14.9	15.8	16.0	16.0
13.5	14.8	15.4	15.4	15.1	14.7	14.9	15.2	15.3	15.0	14.2	13.7	6°	15.8	16.0	15.6	14.7	13.4	12.8	13.1	14.0	15.0	15.7	15.8	15.7
14.3	15.0	15.5	15.5	14.9	14.4	14.6	15.1	15.3	15.1	14.5	14.1	4°	15.5	15.8	15.6	14.9	13.8	13.2	13.4	14.3	15.1	15.6	15.5	15.4
14.7	15.0	15.0	15.3	14.6	14.2	14.3	14.9	15.3	15.3	14.8	14.4	2°	15.3	15.7	15.7	15.1	14.1	13.5	13.7	14.5	15.2	15.5	15.3	15.1
15.0	15.5	15.7	15.3	14.4	13.9	14.1	14.8	15.3	15.4	15.1	14.8	0°	15.0	15.2	15.7	15.3	14.4	13.9	14.1	14.8	15.3	15.4	15.1	14.8

Cuadro N°4.- Duración máxima diaria media de las horas de fuente insolación (N) en diferentes meses y latitudes

Latitud Norte	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
Latitud Sur	Jul	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.
50°	8.5	10.1	11.8	13.8	15.4	16.3	15.9	14.5	12.7	10.8	9.1	8.1
48°	8.8	10.2	11.8	13.6	15.2	16.0	15.6	14.3	12.6	10.9	9.3	8.3
46°	9.1	10.4	11.9	13.5	14.9	15.7	15.4	14.2	12.6	10.9	9.5	8.7
44°	9.3	10.5	11.9	13.4	14.7	15.4	15.2	14.0	12.6	11.0	9.7	8.9
42°	9.4	10.6	11.9	13.4	14.6	15.2	14.9	13.9	12.9	11.1	9.8	9.1
40°	9.6	10.7	11.9	13.3	14.4	15.0	14.7	13.7	12.5	11.2	10.0	9.3
35°	10.1	11.0	11.9	13.1	14.0	14.5	14.3	13.5	12.4	11.3	10.3	9.8
30°	10.4	11.1	12.0	12.9	13.6	14.0	13.9	13.2	12.4	11.5	10.6	10.2
25°	10.7	11.3	12.0	12.7	13.3	13.7	13.5	13.0	12.3	11.6	10.9	10.6
20°	11.0	11.5	12.0	12.6	13.1	13.3	13.2	12.8	12.3	11.7	11.2	10.9
15°	11.3	11.6	12.0	12.5	12.3	13.0	12.9	12.6	12.2	11.8	11.4	11.2
10°	11.6	11.8	12.0	12.3	12.6	12.7	12.6	12.4	12.1	11.8	11.6	11.5
5°	11.8	11.9	12.0	12.2	12.3	12.4	12.3	12.3	12.1	12.0	11.9	11.8
0°	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1

Cuadro N°5.- Factor de evapotranspiración potencial (MF) en mm por mes

Lat Sur	MESES											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
1	2.788	2.117	2.354	2.197	2.137	1.990	2.091	2.216	2.256	2.358	2.234	2.265
2	2.371	2.136	2.357	2.182	2.108	1.956	2.050	2.194	2.251	2.372	2.263	2.301
3	2.353	2.154	2.360	2.167	2.079	1.922	2.026	2.172	2.246	2.386	2.290	2.337
4	2.385	2.172	2.362	2.151	2.050	1.888	1.995	2.150	2.240	2.398	2.318	2.372
5	2.416	2.189	2.363	2.134	2.020	1.854	1.960	2.126	2.234	2.411	2.345	2.407
6	2.447	2.050	2.363	2.117	1.980	1.820	1.976	2.103	2.226	2.422	2.371	2.442
7	2.478	2.221	2.363	2.099	1.959	1.785	1.893	2.078	2.218	2.233	2.397	2.476
8	2.508	2.237	2.362	2.081	1.927	1.750	1.858	2.054	2.210	2.443	2.423	2.510
9	2.538	2.251	2.360	2.062	1.896	1.715	1.824	2.028	2.201	2.453	2.448	2.544
10	2.567	2.266	2.357	2.043	1.864	1.679	1.789	2.003	2.191	2.462	2.473	2.577
11	2.596	2.279	2.354	2.023	1.832	1.644	1.754	1.976	2.180	2.470	2.497	2.610
12	2.625	2.292	2.350	2.002	1.799	1.608	1.719	1.950	2.169	2.477	2.520	2.643
13	2.652	2.305	2.345	1.981	1.767	1.572	1.684	1.922	2.157	2.464	2.543	2.675
14	2.680	2.317	2.340	1.959	1.733	1.536	1.648	1.895	2.144	2.490	2.566	2.706
15	2.707	2.326	2.334	2.937	1.700	1.500	1.612	1.867	2.131	2.496	2.588	2.738
16	2.734	2.339	2.317	1.914	1.666	1.464	1.576	1.838	2.117	2.500	2.610	2.769
17	2.760	2.349	2.319	1.891	1.632	1.427	1.540	1.809	2.103	2.504	2.631	2.799
18	2.785	2.359	2.311	1.867	1.598	1.391	1.504	1.780	2.068	2.508	2.651	2.830
19	2.811	2.368	2.302	1.843	1.564	1.354	1.467	1.750	2.072	2.510	2.671	2.859

2. En base a la temperatura

La ecuación es la siguiente:

$$\boxed{ETP = MF * TMF * CH * CE} \dots\dots\dots (12)$$

Dónde:

- ETP** = Evapotranspiración potencial (mm/mes)
MF = Factor mensual de latitud, se obtiene del Cuadro N°5
TMF = Temperatura media mensual (°F), medida
CH = Factor de corrección para la humedad relativa, y
CE = Factor de corrección para la altura o elevación del lugar

$$\boxed{CH = 0.166 (100 - HR)^{1/2}} \dots\dots\dots (13)$$

Dónde:

HR = Humedad relativa media mensual (%), medida.

Si, $HR > 64\%$, se emplea la fórmula anterior, en caso $HR < 64\%$, $CH = 1$, y

$$\boxed{CE = 1.0 + 0.04 * \frac{E}{2,000}} \dots\dots\dots (14)$$

E = Latitud o elevación del lugar (msnm)

Ejemplo:

Calcular la ETP, para Huancayo y para el mes de Setiembre, mediante la ecuación (12)

Datos:

- Latitud** = $12^{\circ} 02'$
Altitud = 3,313 m.s.n.m
HR = 63%
Mes = Setiembre
TMF = $11.4^{\circ}C = 52.5^{\circ}F$

Solución:

$$CE = 1.0 + 0.04 * \frac{E}{2,000}$$

$$CE = 1 + 0.04 * \frac{3,313}{2,000}$$

$$CE = 1.066$$

Del cuadro N°5 se obtiene:

$$MF = 2.169$$

Como:

$$HR = 63\%$$

Debido a que $HR < 64\%$ se considera: $CH = 1.0$

$$CE = 1.066$$

Luego:

$$ETP = MF * TMF * CH * CE$$

$$ETP = 2.169 * 52.5 * 1.0 * 1.066$$

$$ETP = 121.4 \text{ mm/mes}$$

Rpta: ETP = 4.05 mm/día

b.2) Método de Penman modificado:

Penman (1948) obtuvo una ecuación para calcular la evaporación de una superficie de agua libre (E_o), de manera que para pasar a evapotranspiración se usa un factor reductor cuyos valores oscilan desde 0.6 para los meses invernales a 0.8 para los de verano. Dicho factor tiene en cuenta el menor número de horas diarias que los estomas permanecen abiertos. Posteriormente, Penman y Schofield (1951) propusieron una ecuación para calcular directamente la evapotranspiración potencial (ETP):

$ETP = (R_n + E_o) / (\gamma e' d)$	 (15)
-------------------------------------	------------

Donde ésta representa la resistencia a la difusión a través de los estomas, ya que es un factor estomático y “d” es un factor derivado de la duración del día.

La ecuación de Penman fue luego simplificada por el propio autor en 1963. Las verificaciones a las que ha sido sometida permitieron un mejoramiento sustancial de la misma; a tal punto que el estudio de la American Society of Civil Engineers (Jensen, 1974) lo ubica como el procedimiento más exacto para un amplio rango de condiciones meteorológicas, lo que coincide con la conclusión del estudio de la FAO.

Las consideraciones que siguen para estimar la evapotranspiración potencial del cultivo de referencia (ETP) con la fórmula de Penman han sido tomadas del estudio de la FAO, que es aplicable para zonas donde se dispone de datos de: temperaturas, humedad relativa, velocidad de viento, entre otras variables. Dicha ecuación ha sido obtenida a través de un procedimiento de ecuaciones combinadas. La relación propuesta por la FAO y que utiliza este método es la siguiente:

$$\text{ETP} = c [W \cdot R_n + (1 - W) \cdot f(u) \cdot (P_{sv} - P_{va})] \quad \dots\dots\dots (16)$$

Dónde:

- ETP** : Evapotranspiración potencial (mm/día);
- c** : Factor de corrección para compensar los efectos del clima; durante el día y la noche. Cuadro N°14;
- W** : Factor de ponderación, que considera el efecto de la radiación sobre la ETP a diferentes temperaturas y altitudes, dado en el Cuadro N°9;
- R_n** : Radiación neta en equivalente de evaporación (mm/día);
- f(u)** : Función relacionada con el viento;
- P_{sv}** : Presión saturante del vapor (mb);
- P_{va}** : Presión del vapor medio del aire (mb).

Además:

a) $\text{R}_n = \text{R}_{ns} - \text{R}_{n1}$

Donde:

Rns : Radiación neta de onda corta:

Rn1 : Radiación neta de onda larga

b)
$$f(u) = 0.27 * (1 + U_2 / 100)$$

Dónde:

U_2 = Velocidad del viento en Km/día a la altura de 2 m sobre el suelo.

Cuando no se cuenta con datos de viento a una altura de 2 m, se puede utilizar la siguiente expresión:

$$f_c = 1.1663 - 0.05082 * h$$

Dónde:

h : Altitud del anemómetro en metros sobre el nivel del suelo;

fc : Factor de corrección de la velocidad del viento a una altura h.

Luego:

$$U_2 = f_c * U_h$$

U_h : Velocidad del viento a la altura **h** sobre el suelo.

El cuadro adjunto permite obtener f_c para diferentes altitudes de medición del viento.

Factores para corregir la velocidad del viento

Altura de Medición h (m)	0.50	1.00	1.50	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	10.00
Factor de Corrección (fc)	1.35	1.15	1.06	1.00	0.93	0.88	0.85	0.83	0.77

Ejemplo:

Calcular la ETP, para las siguientes condiciones.

Mes: Mayo

Latitud	=	12 ° 05'
Altitud	=	243.7 m.s.n.m
Temperatura media mensual (T°_{media})	=	18°C
Presión saturante del vapor (P_{sv})	=	22.2 mb
Presión del vapor medio del aire (P_{va})	=	17.7 mb
Radiación solar en la estación (R_s)	=	2.9 mm/día
Número de horas de sol (n)	=	5.3 horas
Velocidad del viento a 6 m sobre el suelo (U_6)	=	96.0 Km/día
Humedad relativa media (HR)	=	90.0 %
Relación diurna / nocturna de velocidad de viento ($U_{día} / U_{noche}$)	=	4

- Determinación de la diferencia de presión de vapor ($P_{sv} - P_{va}$)

Caso I

Si se tiene los siguientes datos medidos:

$$P_{sv} = 22.2 \text{ mb}$$

$$P_{va} = 17.7 \text{ mb}$$

Luego, la diferencia de presión de vapor será:

$$(P_{sv} - P_{va}) = 22.2 \text{ mb} - 17.7 \text{ mb}$$

$$(P_{sv} - P_{va}) = 4.5 \text{ mb}$$

Caso II

Si se tiene los siguientes datos medidos:

$$\text{Temperatura máxima } (T^{\circ}_{m\acute{a}x}) = 30^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Temperatura mínima } (T^{\circ}_{m\acute{i}n}) = 12^{\circ}\text{C}$$

Humedad relativa máxima ($HR_{\text{máx}}$) = 98%

Humedad relativa mínima ($HR_{\text{mín}}$) = 68 %

Cálculo de:

- $T^{\circ}_{\text{media}} = (30^{\circ}\text{C} + 12^{\circ}\text{C}) / 2 = 21^{\circ}\text{C}$
- $HR_{\text{media}} = (98\% + 68\%) / 2 = 83\%$
- Psv se calcula haciendo uso del Cuadro N°6, al cual se entra con la $T^{\circ}_{\text{media}} (21^{\circ}\text{C})$ y de allí se determina que: **Psv = 24.9 mb.**

Luego para obtener la presión de vapor medio (Pva), se utiliza la siguiente expresión:

$$Pva = Psv * (HR_{\text{media}} / 100\%)$$

$$Pva = (24.9 \text{ mb}) * (83\% / 100\%)$$

$$Pva = 20.7 \text{ mb}$$

$$(Psv - Pva) = 24.9 \text{ mb} - 20.7 \text{ mb}$$

$$(Psv - Pva) = 4.2 \text{ mb}$$

Caso III

Si se tiene los siguientes datos medidos:

Temperatura máxima ($T^{\circ}_{\text{máx}}$) = 30° C

Temperatura mínima ($T^{\circ}_{\text{mín}}$) = 12° C

Temperatura bulbo seco (T°_{bs}) = 24° C

Temperatura bulbo húmedo (T°_{bh}) = 20° C

Altitud del lugar (m.s.n.m.) = 243.7

Psv se obtiene a partir del cuadro N°6, en base a la ($T^{\circ}_{\text{media}} = 21^{\circ}\text{C}$), luego:

Psv = 24.9 mb.

Pva, se obtiene a partir del Cuadro N°7, en base a la altitud, diferencia de ($T^{\circ}_{\text{bs}} - T^{\circ}_{\text{bh}}$) y T°_{bs} , luego:

Pva = 20.7 mb

La diferencia de presión de vapor será:

$$(Psv - Pva) = 24.9 \text{ mb} - 20.7 \text{ mb}$$

$$(Psv - Pva) = 4.2 \text{ mb}$$

Caso IV

Si se tiene los siguientes datos medidos:

$$\text{Temperatura máxima } (T^{\circ}_{\text{máx}}) = 30^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Temperatura mínima } (T^{\circ}_{\text{min}}) = 12^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Temperatura punto de rocío } (T^{\circ}_{\text{pr}}) = 18^{\circ}\text{C}$$

Psv se obtiene a partir del Cuadro N°6 en base a la T°_{media} (21°C) luego:

$$\mathbf{Psv} = 24.9 \text{ mb}$$

Pva, se obtiene a partir del Cuadro N°8, en base a la T°_{pr} (18°C) luego:

$$\mathbf{Pva} = 20.6 \text{ mb}$$

La diferencia de presión será:

$$(Psv - Pva) = 24.9 \text{ mb} - 20.6 \text{ mb}$$

$$(Psv - Pva) = 4.3 \text{ mb}$$

- Determinación de la función $f(u)$

Sabemos que:

$$f(u) = 0.27 * (1 + U_2 / 100)$$

$$U_2 = fc * U_6$$

$$fc = \text{factor de corrección para una altitud de 6 m} \\ (\text{obtenida de cuadro anterior, } fc = 0.83)$$

$$U = U_6 = 96 \text{ Km/día}$$

$$U_2 = fc * U_6 = 0.83 * 96 = 79.7 \text{ Km/día}$$

Entonces:

$$F(\mu) = 0.27 * (1 + U_2/100)$$

$$F(\mu) = 0.27 * (1 + 79.7/100)$$

$$\mathbf{F(\mu)} = 0.49$$

- Determinación del factor de ponderación W

Caso I

Si se tienen los siguientes datos medidos:

$$\begin{aligned} T^{\circ}_{\text{media}} &= 18^{\circ}\text{C} \quad \text{y} \\ \text{Altitud} &= 243.7 \text{ m.s.n.m} \end{aligned}$$

W, se obtiene del Cuadro N°9, en base a la T°_{media} , y Altitud, luego:

$$W = 0.67$$

Caso II

Si se tienen los siguientes datos medidos:

$$\begin{aligned} T^{\circ}_{\text{máx}} &= 30^{\circ}\text{C} \\ T^{\circ}_{\text{mín}} &= 12^{\circ}\text{C} \\ \text{Altitud} &= 243.7 \text{ m.s.n.m} \end{aligned}$$

Al igual que en el Caso I, se obtiene interpolando del Cuadro N°9, de donde:

$$W = 0.71$$

- Determinación del factor de Ponderación (1 – W)

Si $W = 0.67$, entonces $(1 - W) = 0.33$

Si $W = 0.71$, entonces $(1 - W) = 0.29$

- Determinación de la radiación neta (Rn)

La Radiación Neta está dada por la siguiente relación:

$$R_n = R_{ns} - R_{nl}$$

- Determinación de la radiación neta en onda corta (Rns)

$$Rns = 0.75 * Rs$$

Donde:

Rs = Radiación Solar en la estación = 2.9 mm/día

Luego:

$$Rns = 0.75 * 2.9 = 2.20 \text{ mm/día}$$

- Determinación de la radiación neta en onda larga (Rn1)

Dónde:

$$Rn1 = f(t) * f(Pva) * f(n/N)$$

- Determinación de la función f(n/N)

Si se tienen los siguientes datos:

Mes: Mayo

Latitud S = 12° 05'

n/N, se obtiene a partir del Cuadro N°10, en base al mes y la Latitud se obtiene el valor de la duración máxima diaria media igual N = 11.6 hr, luego como n = 5.3 (datos del problema), entonces:

$$n/N = 0.46$$

Reemplazando en la ecuación $f(n/N) = 0.1 + 0.9 * n/N$, se obtiene un valor de $f(n/N) = 0.51$ También se puede determinar $f(n/N)$, utilizando el Cuadro N°11, en base a la relación n/N, luego:

$$f(n/N) = 0.51$$

- Determinación de la función $f(t)$

Datos:

$$T^{\circ}_{\text{media}} = 18^{\circ} \text{ C}$$

$f(t)$, se obtiene a partir del Cuadro N°12, en base a la T° media, del cual se obtiene un valor de:

$$f(t) = 14.20$$

- Determinación de la función $f(Pva)$

Datos:

$$Pva = 17.7 \text{ mb}$$

Pva , se puede determinar con la siguiente relación:

$$f(Pva) = 0.34 - 0.044 * \sqrt{Pva}$$

$$f(Pva) = 0.34 - 0.044 * \sqrt{17.7}$$

$$f(Pva) = 0.154$$

También se puede determinar el valor de $f(Pva)$ a partir del Cuadro N°13, en base a la presión de vapor del aire (Pva). Conocemos que el valor de $Pva = 17.7 \text{ mb}$; por lo tanto se puede determinar:

$$f(Pva) = 0.15$$

Por lo tanto:

$$Rn1 = f(t) * f(Pva) * f(n/N)$$

$$Rn1 = (14.2) * (0.15) * (0.51)$$

$$Rn1 = 1.09 \text{ mm/día}$$

Luego en la ecuación:

$$Rn = Rns - Rn1$$

$$Rn = 2.20 \text{ mm/día} - 1.09 \text{ mm/día}$$

$$Rn = 1.11 \text{ mm/día}$$

- Determinación del factor c

Si se tienen los siguientes datos medidos:

$$\begin{aligned} U_{\text{día}} &= U_2 = 79.6 \text{ km/día} = 0.92 \text{ m/s} \\ HR_{\text{máx}} &= 90\% \\ R_s &= 2.9 \text{ mm/día} \\ U_{\text{día}}/U_{\text{noche}} &= 4 \end{aligned}$$

c, se obtiene a partir del Cuadro N°14, en base $U_{\text{día}}$, $U_{\text{día}}/U_{\text{noche}}$, $HR_{\text{máx}}$, y R_s , luego:

$$\boxed{c = 1.02}$$

- Determinación de la ETP

Reemplazando los parámetros determinados anteriormente en la ecuación:

$$\boxed{ETP = c [W * R_n + (1 - w) * f(u) * (P_{sv} - P_{va})]}$$

$$ETP = 1.02 [0.67 * 1.11 + (0.33) * (0.49) * (4.5)]$$

Se obtiene que:

$$\text{Rpta: } \boxed{ETP = 1.50 \text{ mm/día}}$$

Cuadro N°6.- Presión saturante del vapor (Psv) en función de la temperatura media del aire T (°C)

Temperatura T(°C)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Psv (mbar)	6.1	6.6	7.1	7.6	8.1	8.7	9.4	10.0	10.7	11.5	12.3	13.1	14.0	15.0	16.1	17.0	18.2	19.4	20.6	22.0

Temperatura T(°C)	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
Psv (mbar)	23.4	24.9	26.4	28.1	29.8	31.7	33.6	35.7	37.8	40.1	42.4	44.9	47.6	50.3	53.2	56.2	59.4	62.8	66.3	69.9

Cuadro N°7.- Presión del vapor (Pva) calculada a partir de datos de termómetros seco y húmedo (°C) (psicrómetro ventilado)

Termómetro húmedo (diferencial)(Tbh en °C), altitud 0 – 1,000 m												Termómetro seco		Termómetro húmedo (diferencial)(Tbh en °C, altitud 1,000 – 2,000 m											
0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	(Tbs °C)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	
73.8	64.9	56.8	49.2	42.2	35.8	29.8	24.3	19.2	14.4	10.1	6.0	40	73.8	65.2	57.1	49.8	43.0	41.8	31.0	25.6	20.7	16.2	12.0	8.1	
66.3	58.1	50.5	43.6	37.1	31.1	25.6	20.5	15.8	11.4	7.3		38	66.3	58.2	50.9	44.1	37.9	36.7	26.8	21.8	17.3	13.2	9.2	5.2	
59.4	51.9	44.9	38.4	32.5	26.9	21.8	17.1	12.7	8.6	4.9		36	59.4	52.1	45.2	39.0	33.3	32.1	23.0	18.4	14.3	10.4	6.8	3.5	
53.3	46.2	39.8	33.8	28.3	23.2	18.4	14.0	10.0	6.2			34	53.2	46.4	40.1	34.4	29.1	24.1	19.6	15.4	11.5	8.0	4.6	1.5	
47.5	41.1	35.1	29.6	24.5	19.8	15.4	11.3	7.5	4.0			32	47.5	41.3	35.5	30.2	25.3	20.7	16.6	12.6	9.1	5.8	2.6		
42.4	36.5	30.9	25.8	21.1	16.7	12.6	8.8	5.3				30	42.4	36.7	31.3	26.4	21.9	17.7	13.8	10.2	6.9	3.8			
37.8	32.3	27.2	22.4	18.0	14.0	10.0	6.7	3.4				28	37.8	32.5	27.5	23.0	18.9	14.9	11.4	8.0	4.9	2.1			
33.6	28.5	23.8	19.4	15.3	11.5	8.0	4.7	1.6				26	33.6	28.7	24.1	20.0	16.1	12.5	9.2	6.0	3.2	0.5			
29.8	25.1	20.7	16.6	12.8	9.3	6.0	2.9					24	29.8	25.3	21.1	17.2	13.9	10.3	7.2	4.3	1.6				
26.4	22.0	18.0	14.2	10.6	7.4	4.3	1.4					22	26.4	22.3	18.3	14.3	11.5	8.3	5.5	2.7	0.2				
23.4	19.3	15.5	12.0	8.7	5.6	2.7						20	23.4	19.5	15.9	12.6	9.5	6.6	3.9	1.3					
20.6	16.8	13.3	10.0	6.9	4.1	1.4						18	20.6	17.1	13.7	10.6	7.8	5.0	2.5	0.1					
18.2	14.6	11.4	8.3	5.4	2.7							16	18.2	14.9	11.7	8.9	6.2	3.6	1.3						
16.0	12.7	9.6	6.7	4.0	1.5							14	16.0	12.9	10.0	7.3	4.8	2.4	0.3						
14.0	10.9	8.1	5.3	2.8								12	14.0	11.2	8.4	5.9	3.6	1.4							
12.3	9.4	6.7	4.1	1.7								10	12.3	9.6	7.0	4.7	2.6	0.4							
10.7	8.0	5.5	3.1	0.8								8	10.7	8.2	5.8	3.7	1.6								
9.3	6.8	4.4	2.1									6	9.3	7.0	4.8	2.7	0.7								
8.1	5.7	3.4	1.6									4	8.0	6.0	3.8	1.8									
7.1	4.8	2.8	0.8									2	7.1	5.0	2.9	1.0									
6.1	4.0	2.0										0	6.1	4.1	2.1										

Cuadro N°8.- Presión del vapor (Pva) calculada a partir de la temperatura en el punto de rocío

Temperatura °C	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40
Pva	6.1	7.1	8.1	9.3	10.7	12.3	14.0	16.0	18.2	20.6	23.4	26.4	29.8	33.6	37.8	42.4	47.5	53.2	59.4	66.3	73.8

Cuadro N°9.- Valores del factor de ponderación (W) a diferentes temperaturas y altitudes

Temperatura °C	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40
Altitud (msnm)																				
0	0.43	0.46	0.49	0.52	0.55	0.58	0.61	0.64	0.66	0.68	0.71	0.73	0.75	0.77	0.78	0.80	0.82	0.83	0.84	0.85
500	0.44	0.48	0.51	0.54	0.57	0.60	0.62	0.65	0.67	0.70	0.72	0.74	0.76	0.78	0.79	0.81	0.82	0.84	0.85	0.86
1,000	0.46	0.49	0.52	0.55	0.58	0.61	0.64	0.66	0.69	0.71	0.73	0.75	0.77	0.79	0.80	0.82	0.83	0.85	0.86	0.87
2,000	0.49	0.52	0.55	0.58	0.61	0.64	0.66	0.69	0.71	0.73	0.75	0.77	0.79	0.81	0.82	0.84	0.85	0.86	0.87	0.88
3,000	0.52	0.55	0.58	0.61	0.64	0.66	0.69	0.71	0.73	0.75	0.77	0.79	0.81	0.82	0.84	0.85	0.86	0.87	0.88	0.89
4,000	0.54	0.58	0.61	0.64	0.66	0.69	0.71	0.73	0.75	0.77	0.79	0.81	0.82	0.84	0.85	0.86	0.87	0.89	0.90	0.90

Cuadro N°10.- Duración máxima diaria media de las horas de fuerte insolación (N) en diferentes meses y latitudes

Lat. Norte Lat. Sur	Ene. Jul.	Feb. Ago.	Mar. Set.	Abr. Oct.	May. Nov.	Jun. Dic.	Jul. Ene.	Ago. Feb.	Set. Mar.	Oct. Abr.	Nov. May.	Dic. Jun.
50°	8.5	10.1	11.8	13.8	15.4	16.3	15.9	14.5	12.7	10.8	9.1	8.1
48°	8.8	10.2	11.8	13.6	15.2	16.0	15.6	14.3	12.6	10.9	9.3	8.3
46°	9.1	10.4	11.9	13.5	14.9	15.7	15.4	14.2	12.6	10.9	9.5	8.7
44°	9.3	10.5	11.9	13.4	14.7	15.4	15.2	14.0	12.6	11.0	9.7	8.9
42°	9.4	10.6	11.9	13.4	14.6	15.2	14.9	13.9	12.9	11.1	9.8	9.1
40°	9.6	10.7	11.9	13.3	14.4	15.0	14.7	13.7	12.5	11.2	10.0	9.3
35°	10.1	11.0	11.9	13.1	14.0	14.5	14.3	13.5	12.4	11.3	10.3	9.8
30°	10.4	11.1	12.0	12.9	13.6	14.0	13.9	13.2	12.4	11.5	10.6	10.2
25°	10.7	11.3	12.0	12.7	13.3	13.7	13.5	13.0	12.3	11.6	10.9	10.6
20°	11.0	11.5	12.0	12.6	13.1	13.3	13.2	12.8	12.3	11.7	11.2	10.9
15°	11.3	11.6	12.0	12.5	12.8	13.0	12.9	12.6	12.2	11.8	11.4	11.2
10°	11.6	11.8	12.0	12.3	12.6	12.7	12.6	12.4	12.1	11.8	11.6	11.5
5°	11.8	11.9	12.0	12.2	12.3	12.4	12.3	12.3	12.1	12.0	11.9	11.8
0°	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1

Cuadro N°11.- Corrección para la relación entre las horas reales de fuerte insolación y las máximas posibles $f(n/N)$ con respecto a la radiación de ondas largas ($Rn1$)

n/N	0	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00
$f(n/N) = 0.1 + 0.9n/N$	0.10	0.15	0.19	0.24	0.28	0.33	0.37	0.42	0.46	0.51	0.55	0.60	0.69	0.73	0.78	0.82	0.87	0.91	0.96	1.00	1.00

Cuadro N°12.- Corrección para la temperatura $f(t)$ con respecto a la radiación de ondas largas ($Rn1$)

$t^{\circ}C$	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36
$f(t) = 1$	11.0	11.4	11.7	12.0	12.4	12.7	13.1	13.5	13.8	14.2	14.6	15.0	15.4	15.9	16.3	16.7	17.2	17.7	18.1

Cuadro N°13.- Corrección para la presión del vapor $f(Pva)$ con respecto a la radiación de ondas largas ($Rn1$)

Pva mbar	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40
$f(Pva) = 0.34 - 0.044$ *	0.20	0.22	0.20	0.19	0.18	0.16	0.11	0.14	0.13	0.12	0.12	0.11	0.10	0.09	0.08	0.08	0.07	0.06

Cuadro N°14.- Factor de corrección (c) en la ecuación de Penman

RS, mm/día	HR _{máx} = 30%				HR _{máx} = 60%				HR _{máx} = 90%			
	3	6	9	12	3	6	9	12	3	6	9	12
U _{día} , m/s	U _{día} / U _{noche} = 4.0											
0	0.86	0.90	1.00	1.00	0.96	0.98	1.05	1.05	1.02	1.06	1.10	1.10
3	0.79	0.24	0.92	0.97	0.92	1.00	1.11	1.19	0.99	1.10	1.27	1.32
6	0.68	0.77	0.87	0.93	0.85	0.96	1.11	1.19	0.94	1.10	1.26	1.33
9	0.55	0.65	0.78	0.90	0.76	0.88	1.02	1.14	0.88	1.01	1.16	1.27
U _{día} / U _{noche} = 3.0												
0	0.83	0.90	1.00	1.00	0.96	0.98	1.05	1.05	1.02	1.06	1.10	1.10
3	0.76	0.81	0.88	0.94	0.87	0.96	1.06	1.12	0.94	1.04	1.18	1.28
6	0.61	0.68	0.81	0.88	0.77	0.88	1.02	1.10	0.86	1.01	1.15	1.22
9	0.46	0.56	0.72	0.82	0.67	0.79	0.88	1.05	0.78	0.92	1.06	1.18
U _{día} / U _{noche} = 2.0												
0	0.86	0.90	1.00	1.00	0.96	0.98	1.05	1.05	0.10	1.06	1.10	1.10
3	0.69	0.76	0.85	0.92	0.83	0.91	0.99	1.05	0.89	0.98	1.10	1.14
6	0.53	0.61	0.74	0.84	0.70	0.80	0.94	1.02	0.79	0.92	1.05	1.12
9	0.37	0.48	0.65	0.76	0.59	0.70	0.84	0.95	0.71	0.81	0.96	1.06
U _{día} / U _{noche} = 1.0												
0	0.86	0.90	1.00	1.00	0.96	0.98	1.05	1.05	1.02	1.06	1.10	1.10
3	0.64	0.71	0.82	0.89	0.78	0.86	0.94	0.99	0.85	0.92	1.10	1.05
6	0.43	0.53	0.68	0.79	0.62	0.70	0.84	0.93	0.72	0.82	0.95	1.00
9	0.27	0.41	0.59	0.70	0.50	0.60	0.75	0.87	0.62	0.72	0.87	0.96

4.3 Evapotranspiración real o actual (ETA)

La evapotranspiración real o actual es la tasa de evaporación y transpiración de un cultivo exento de enfermedades, que crece en un campo extenso (1 ó más hectáreas) en condiciones óptimas de suelo, fertilidad y suministro de agua.

La evapotranspiración actual es llamada también “uso consuntivo”. Su cálculo se efectúa mediante la relación:

$$\boxed{ETA = K * ETP} \quad \dots\dots\dots (17)$$

Dónde:

- ETA** : Evapotranspiración real o actual del cultivo considerado, (mm ó cm),
ETP : Evapotranspiración potencial, (mm ó cm), y
K : Coeficiente que tiene en cuenta el efecto de la relación a agua-suelo-planta.

El Factor K está dado por la relación:

$$\boxed{K = K_c * K_s * K_h} \quad \dots\dots\dots (18)$$

Dónde:

- K_c** : Factor de cultivo,
K_s : Factor de suelo, y
K_h : Factor de humedad.

Para suelos profundos de adecuadas condiciones físicas y de buena disponibilidad de elementos nutritivos $K_s = 1.00$. Este mismo valor tiene K_h para condiciones de óptimo abastecimiento de agua, por lo tanto, K depende fundamentalmente de K_c . El factor humedad K_h , puede expresarse matemáticamente mediante la expresión:

$$\boxed{K_h = \frac{(\theta_i - \theta_{pmp})}{(\theta_{cc} - \theta_{pmp})}} \quad \dots\dots\dots (19)$$

Dónde:

- θ_{cc} = Contenido de humedad del suelo a capacidad de campo (masa %)
 θ_{pmp} = Contenido de humedad de suelo a punto de marchitez permanente (masa %)
 θ_i = Contenido de humedad del suelo en el momento *i* (masa%)
 En consecuencia, el valor de K_h variará entre 1 y 0.

El factor K_c depende de las características anatómicas, morfológicas y fisiológicas de los cultivos y expresa la variación de su capacidad para extraer agua del suelo durante su ciclo vegetativo. El factor K_c está determinado por el volumen foliar del cultivo.

Luego:

$$\boxed{ETA = K_c * ETP} \dots\dots\dots (20)$$

Para calcular ETA de un cultivo cualquiera, se calcula en primer lugar el valor de ETP por cualquiera de los métodos mencionados anteriormente; luego se calcula el valor de K_c según el estado de desarrollo del cultivo, asumiendo que los otros factores de la ecuación (13) tiene valor 1.

4.4. Factor de cultivo (K_c)

Llamado también coeficiente de cultivo, es un factor que indica el grado de desarrollo o cobertura del suelo por el cultivo del cual se requiere evaluar su consumo de agua.

Determinación del coeficiente de cultivo (K_c)

Los factores que afectan los valores de K_c son principalmente: las características del cultivo, fecha de siembra, ritmo de desarrollo del cultivo, duración del período vegetativo, condiciones climáticas y la frecuencia de lluvia o riego, especialmente durante la primera fase de crecimiento.

El coeficiente K_c de cada cultivo tendrá una variación estacional en función de las fases de desarrollo del cultivo y que son las siguientes:

a. Fase inicial: Fase 1

Comprende el periodo de germinación y crecimiento inicial cuando la superficie del suelo está cubierta apenas o nada por el cultivo, desde la siembra hasta el 10% de cobertura vegetal.

b. Fase de desarrollo del cultivo: Fase 2

Comprende desde el final de la fase inicial hasta que se llega a una cubierta sombreada efectiva completa del orden de 70 – 80%

c. Fase de mediados del periodo (Maduración): Fase 3

Comprendida desde que se obtiene la cubierta sombreada efectiva completa hasta el momento de iniciarse la maduración que se hace evidente por la decoloración o caída de hojas.

d. Fase final del periodo vegetativo (cosecha): Fase 4

Comprende desde el final de la fase anterior hasta que llega a la plena maduración o cosecha.

Procedimiento

El K_c puede determinarse en el campo o puede estimarse mediante lo recomendado en la publicación N°24 de la FAO. Para la determinación del factor K_c se siguen los siguientes pasos:

- a. Se define el cultivo a establecer.
- b. Se determina el período vegetativo y la duración de cada etapa de desarrollo del cultivo: inicial, desarrollo, maduración y cosecha.
- c. Se determina el valor de K_c para la etapa inicial del cultivo, mediante el gráfico que relaciona frecuencia de riego y evapotranspiración potencial (ETP). Para ello, se asume una frecuencia de riego práctica de acuerdo al cultivo y zona donde se trabaja (ver Figura N°17).
- d. Se determina el valor de K_c para las etapas de maduración y cosecha en base a los cuadros que relacionan el valor de K_c con los valores de humedad relativa y velocidad del viento (ver Cuadro N°15).
- e. Se construye la curva K_c , relacionando los valores de K_c y las etapas de desarrollo del cultivo (ver Figura N°18). El ploteo se efectúa de la siguiente manera:
 - El valor de K_c para la etapa inicial, corresponderá para la parte final de dicha etapa.
 - El valor de K_c para la etapa de maduración, corresponderá a toda la etapa.
 - El valor de K_c para la etapa de cosecha, corresponderá a la parte final de dicha etapa.

Unir mediante líneas rectas los valores de K_c , de la parte final de la etapa inicial con el inicio de la etapa de maduración y la parte

final de la etapa de maduración con la parte final la de la etapa de cosecha.

- Trazar la curva suavizada y representativa.
- f. La curva trazada constituirá la curva K_c del cultivo que se analiza. Sobre la base de esta curva se determinará los valores de dicho factor que corresponden a cualquier fecha de interés.

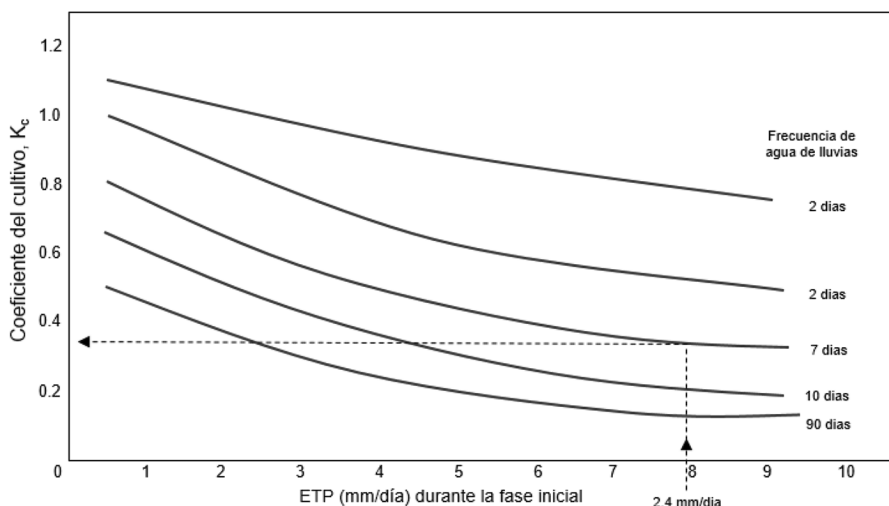


Figura N°17.- Relación ETP – K_c y frecuencia de riego

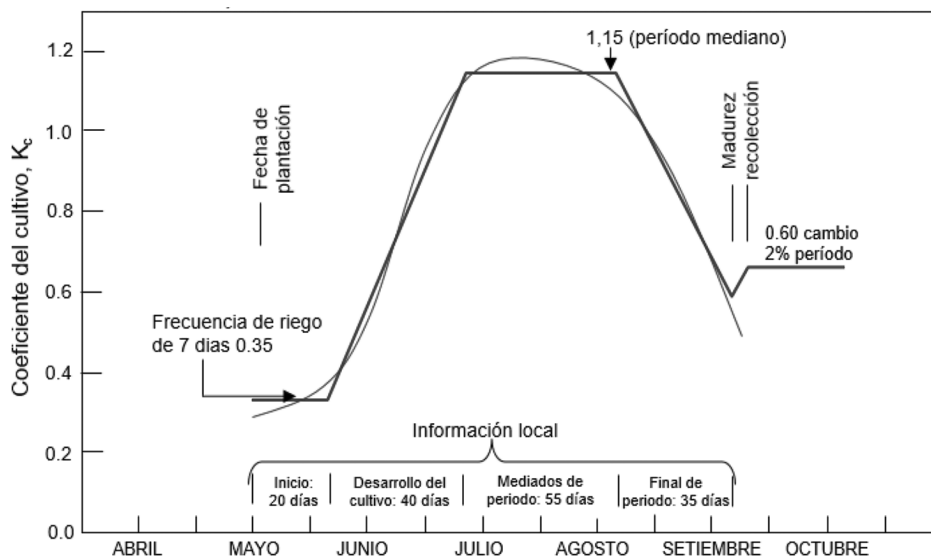


Figura N°18.- Curva típica del factor de cultivo

Cuadro N°15.- Valores de K_c para diferentes cultivos según el clima y la fase de crecimiento

Cultivos	Humedad relativa		$HR_{min} > 70\%$		$HR_{min} < 70\%$	
	Viento (m/seg)		0 – 5	5 – 8	0 – 5	5 – 8
	Fase de desarrollo		K_c			
Lechuga	3		0.95	0.95	1.00	1.05
	4		0.90	0.90	0.90	1.00
Melones	3		0.95	0.95	1.00	1.50
	4		0.65	0.65	0.75	0.75
Avena	3		1.05	1.10	1.15	1.20
	4		0.25	0.25	0.20	0.20
Cebollas de Cabeza	3		0.95	0.95	1.05	1.10
	4		0.95	0.95	0.80	0.85
Cebollas verdes	3		0.95	0.95	1.00	1.05
	4		0.95	0.95	1.00	1.05
Maní	3		0.95	1.00	1.05	1.10
	4		0.55	0.55	0.60	0.60
Pimientos Frescos	3		0.95	1.00	1.05	1.10
	4		0.80	0.85	0.85	0.90
Papa	3		1.05	1.00	1.15	1.20
	4		0.70	0.70	0.75	0.75
Rabanito	3		0.80	0.80	0.85	0.90
	4		0.75	0.75	0.80	0.85
Sorgo	3		1.00	1.05	1.00	1.15
	4		0.50	0.50	0.55	0.55
Soya	3		1.00	1.05	1.10	1.15
	4		0.45	0.45	0.45	0.45
Espinacas	3		0.95	0.95	1.00	1.05
	4		0.90	0.90	0.95	1.00
Zapallo	3		0.90	0.90	0.95	1.00
	4		0.70	0.70	0.75	0.80
Tomate	3		1.05	1.10	1.20	1.25
	4		0.60	0.60	0.65	0.65
Trigo	3		1.05	1.10	1.15	1.20
	4		0.25	0.25	0.60	0.20
Cultivos Extensivos	3		0.95	0.95	1.10	1.05

Cultivos	Humedad relativa		HR _{min} > 70%		HR _{min} < 70%	
	Viento (m/seg)		0 – 5	5 – 8	0 – 5	5 – 8
	Fase de desarrollo		K _c			
Cebada	3		1.50	1.10	1.15	1.20
	4		0.25	0.25	0.20	0.20
Frijoles Verdes	3		0.95	0.95	1.00	1.05
	4		0.85	0.85	0.90	0.90
Frijoles secos	3		1.05	1.10	1.15	1.20
	4		0.30	0.30	0.25	0.25
Betarraga	3		1.00	1.00	1.05	1.10
	4		0.90	0.90	0.95	1.00
Zanahoria	3		1.00	1.05	1.10	1.15
	4		0.70	0.95	1.00	0.85
Apio	3		1.00	1.05	1.10	1.15
	4		0.70	0.95	1.00	1.05
Maíz choclo	3		1.05	1.10	1.15	1.20
	4		0.95	1.00	1.05	1.10
Maíz (grano)	3		1.05	1.10	1.15	1.20
	4		0.55	0.55	0.60	0.60
Algodón	3		1.05	1.15	1.20	1.25
	4		0.65	0.65	0.65	0.70
Pepino	3		0.90	0.90	0.95	1.00
	4		0.70	0.70	0.75	0.80
Lentejas	3		1.05	1.10	1.15	1.05
	4		0.30	0.30	0.25	0.25

Ejemplo:

Calcular la variación mensual de K_c para el cultivo de papa que forma parte de una cédula de cultivo de un proyecto de riego, ubicado en la zona del valle del Mantaro, cerca de la ciudad de Huancayo.

Datos:

Ubicación e información meteorológica para el mes de setiembre:

- Latitud = 12° 02'
- Temperatura media mensual = 52.5 °F
- Humedad relativa = 63%
- Altitud = 3,313 m.s.n.m

- Información agronómica del cultivo de papa
- Fecha de siembra : Setiembre
- Periodo vegetativo : 5 meses (150 días)
- Duración de los períodos de desarrollo de la papa (días): 35, 35, 35 y 30 días.

Solución:

Cálculo de K_c

En primer lugar, se determina la ETP para la zona y para el mes de setiembre. Ello se logra utilizando la fórmula de Hargreaves obteniéndose:

$$ETP = 4.05 \text{ mm/día}$$

Se asume una frecuencia de riego ($F_r = 7$ días) para la zona y para esa etapa del cultivo (primera fase). Luego con los datos de $F_r = 7$ días y $ETP = 4.05$ mm/día; se ingresa a la Figura N°17 y se halla $K_c = 0.52$, este valor se plotea en un papel cuadrículado.

Con el tipo de cultivo y los datos de humedad relativa de 63% y velocidad promedio de viento de la zona de 2.5 m/seg se entra al Cuadro N°15, y se halla el valor de K_c para las etapas: media (maduración) y fase final (cosecha): obteniéndose:

- | | |
|---------------------------------------|----------------|
| - A mediados del periodo (maduración) | : $K_c = 1.15$ |
| - Fase final (cosecha) | : $K_c = 0.75$ |

Luego, se construye la curva, trazando inicialmente líneas rectas y finalmente se suaviza, llamándose “Curva K_c ” del cultivo de papa.

Cálculo de la evapotranspiración real o actual (ETA)

La ETA se obtiene a partir de la ecuación: $ETA = K_c * ETP$
 Conociéndose los valores de **ETP** y **K_c** como lo explicado anteriormente, se procede al cálculo de ETA.

Para el caso del ejemplo anterior, se tendrá que para el mes de Setiembre, la $ETP = 4.05 \text{ mm/día} = 121.5 \text{ mm/mes}$; de la **Curva K_c** de la papa se halla $K_c = 0.51$, teniéndose finalmente:

Rpta: $ETA = 0.51 * 121.5 = 61.9 \text{ mm/mes}$

4.5 Precipitación efectiva (P_e)

Durante el proceso de almacenamiento hídrico del reservorio “suelo”, la precipitación pluvial constituye un alto porcentaje (en algunos casos el total del contenido de agua en el suelo); pero parte de la lluvia de la que dispone la planta para su desarrollo es únicamente una fracción de esta; la otra parte se pierde por escorrentía, percolación profunda o evaporación.

En este sentido, al volumen de agua de lluvia parcial utilizado por las plantas para satisfacer sus correspondientes necesidades hídricas para su normal desarrollo se le ha definido como precipitación efectiva (P_e).

Existen diversos métodos empíricos para estimar la P_e , como el Water Power Resources Service, Bureau of Reclamation y el Servicio de Conservación de Suelos.

- Método del Water Power Resources Service (WPRS – USA)

Este método considera la distribución de la precipitación efectiva de la siguiente forma:

Cuadro N°16.- Precipitación efectiva (Pe)

Incremento de la precipitación (mm)	% de la Precipitación efectiva
5	0
30	95
55	90
80	82
105	65
130	45
155	25
Más de 155	5

Dado que la precipitación es una variable aleatoria, conviene analizar la lluvia total, probabilísticamente, con el objeto de determinar el valor de la precipitación que cae. Por eso, se determina la frecuencia o probabilidad de ocurrencia mediante la fórmula de Weibull.

$$f = \frac{m}{N+1} \dots\dots\dots (21)$$

Dónde:

f : Frecuencia o probabilidad de ocurrencia,

m : Valor de posición de la lluvia ordenada en forma creciente, y

N : Número total de valores de precipitación mensual (mm).

Los resultados se pueden plotear en un papel de probabilidades con los valores de frecuencia en el eje de las abscisas y la precipitación en el eje de las ordenadas.

La probabilidad de ocurrencias de la lluvia que se adopte dependerá del valor económico del cultivo, considerándose por lo general un valor de 75% de probabilidad de ocurrencia como el más adecuado.

En algunos casos, debido a las mismas características de la lluvia, resulta demasiado conservador adoptar el valor de 75% de probabilidad de ocurrencia. Es más conveniente trabajar con la precipitación total promedio mensual.

- Método del Bureau of Reclamation

Este método es adecuado para climas áridos y semiáridos. Permite obtener la precipitación efectiva acumulada en mm para rangos prefijados de incremento de la precipitación, como se muestra en el Cuadro N°17.

Cuadro N°17.- Precipitación efectiva

Rango de incremento de precipitación (mm)	% de la precipitación efectiva	Rango de precipitación efectiva acumulada (mm)
0.0 – 25.4	90 – 100	22.9 – 25.4
25.4 – 50.8	85 – 95	44.4 – 49.5
50.8 – 76.2	75 – 90	63.5 – 72.4
76.2 – 101.6	50 – 80	76.2 – 92.7
101.6 – 127.0	30 – 60	83.8 – 107.9
127.0 – 152.4	10 – 40	86.4 – 118.1
Más de – 152.4	0 – 10	86.4 – 120.6

- Método del servicio de conservación de suelos

El método más completo en su concepción es el del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos; basado en la precipitación media mensual, la evapotranspiración media mensual y la lámina neta de riego. En el Cuadro N°18, se obtiene la precipitación efectiva en función de la precipitación del mes, para una lámina neta de riego $d_n = 75$ mm. El Cuadro N°19 permite ajustar el valor promedio con un factor mayor que la unidad, cuando $d_n > 75$ mm y menor de la unidad cuando $d_n < 75$ mm.

Al analizar trabajos de acondicionamiento de tierras para riego, indirectamente se está controlando la efectividad de la precipitación, pues cambia la relación lluvia-escorrentía que afecta particularmente a la percolación profunda. En un sistema de riego donde una lluvia encuentra a los suelos con grandes diferencias de humedad, el análisis de la efectividad de la precipitación debe abarcar otros aspectos.

Cuadro N°18.- Factor de ajuste

d_n (mm)	factor	d_n (mm)	factor	d_n (mm)	factor
10.0	0.620	31.25	0.818	70.0	0.990
12.5	0.650	32.0	0.826	75.0	1.000
15.0	0.676	35.0	0.842	80.0	1.004
17.5	0.703	37.5	0.860	85.0	1.008
18.75	0.708	40.0	0.876	90.0	1.012
20.0	0.728	45.0	0.905	95.0	1.016
22.5	0.749	50.0	0.930	100.0	1.020
25.0	0.770	55.0	0.947	125.0	1.040
27.5	0.790	60.0	0.963	150.0	1.060
30.0	0.808	65.0	0.977	175.0	1.070

Dado que la precipitación es un factor muy variable, conviene conocer su valor probable mediante el análisis estadístico, a fin de obtener la precipitación que realmente contribuye al proceso evapotranspirativo. El riego depende, lógicamente, del valor económico del cultivo. En general, para una agricultura de regadío donde se realizan inversiones considerables conviene trabajar con una probabilidad del 80%. Ello significa que en dos de cada diez años puede producirse una precipitación mensual menor de lo previsto. En el caso de posturas naturales, podría en cambio adoptarse una probabilidad menor.

Cuadro N°19.- Precipitación efectiva (USDA, SCS)

Lluvia media Mensual mm	Uso consuntivo medio mensual mm									
	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250
Precipitación efectiva media mensual (mm)										
12.5	7.5	8.0	8.7	9.0	9.2	10.0	10.5	11.2	11.7	12.5
25.0	15.0	16.2	17.5	18.0	18.5	19.7	20.5	22.0	24.5	25.0
37.5	22.5	24.0	26.3	27.5	28.2	29.2	30.5	33.0	36.2	37.5
50.0	25.0	32.2	34.5	35.7	36.7	39.0	40.5	43.7	47.0	50.0
62.5	a 41.7	39.7	42.5	44.5	46.0	48.5	50.5	53.7	57.5	62.5
75.0		46.2	49.7	52.7	59.0	57.5	60.2	63.7	67.5	73.7
87.5		50.0	56.7	60.2	63.7	66.0	69.7	73.7	77.7	84.5
100.0		a 60.7	63.7	67.7	72.0	74.2	78.7	83.0	87.7	95.0
112.5			70.5	75.0	80.2	82.5	87.2	92.7	98.0	105
125.0			75.0	81.5	87.7	90.5	95.7	102	108	115
137.5			a 122	88.7	95.2	98.7	104	111	118	126
150.0				95.2	102	106	112	120	127	136
162.5				100	109	113	120	128	135	145
175.0				a 160	115	120	127	135	143	154
187.5					121	126	134	142	151	161
200.0					125	133	140	145	158	168
225					a 197	144	151	160	171	182
250						150	161	170	183	194
275						a 240	171	181	194	205
300							175	190	203	215
325							a 287	198	213	224
350								200	220	232
375								a 331	225	240
400									a 372	247
425										250
										a 412
450	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

Problema N°1

Calcular la precipitación total mensual al 75% de probabilidad de ocurrencia para el mes de Setiembre y para la ciudad de Huancayo.

Datos:

Precipitación mensual para el mes de Setiembre

Año	Precipitación (mm)	Año	Precipitación (mm)
1958	23.0	1968	18.8
1959	36.0	1969	37.6
1960	31.4	1970	67.7
1961	26.1	1971	24.5
1962	29.0	1972	21.5
1963	32.3	1973	48.1
1964	71.4	1974	53.0
1965	95.5	1975	130.9
1966	52.2	1976	37.4
1967	46.9		

Solución:

Los datos del cuadro anterior se ordenan en forma decreciente, y se calcula la frecuencia (f) tal como sigue:

m	f = * 100	Precipitación (mm)	m	f = * 100	Precipitación (mm)
1	5	130.9	11	55	36.0
2	10	95.5	12	60	32.3
3	15	71.4	13	65	31.4
4	20	67.7	14	70	29.0
5	25	53.0	15	75	26.1
6	30	52.2	16	80	24.5
7	35	48.1	17	85	23.0
8	40	46.9	18	90	21.5
9	45	37.6	19	95	18.8
10	50	37.4			

Para este caso $N = 19$

Dónde:

m = posición **N** = Número total de datos

De acuerdo a los resultados del cuadro, se obtiene una precipitación al 75% de probabilidades de ocurrencia que en este caso es igual a **26.1 mm** (ver cuadro anterior)

Problema N° 2

Calcular la precipitación efectiva para la estación de Huayao (Huancayo) para el mes de Setiembre mediante el método del Water Power Resource Service a partir de la precipitación al 75% de probabilidad de ocurrencia hallada en el problema anterior.

Solución:

Cálculo de la precipitación efectiva

Sobre la base del Cuadro N°16, se calcula el porcentaje de la precipitación efectiva:

Incremento de la Precipitación (mm)	% de la Precipitación efectiva
5	0
30	95
55	90
80	82
105	65
130	45
155	25
más de 155	5

Si se sabe que la probabilidad de ocurrencia de la precipitación al 75% es de 26.1 mm, entonces el cálculo se efectúa de la siguiente forma:

Los 26.1 mm los colocamos para cada “incremento de la precipitación”. Es decir, los 26.1 mm estarán tanto dentro del rango del “Incremento de la Precipitación” de los 5 mm y del rango de los 30 mm. Es decir, los primeros 5 mm del total de los 26.1 mm tendrá un “% de la precipitación efectiva” de 0, y el restante es decir $26.1 - 5.0 = 21.1$ mm estará dentro del rango de los 30 mm del “Incremento de la Precipitación” para el cual le corresponde un “% de la Precipitación efectiva” del 95% (ver cuadro anterior).

Finalmente, el cálculo de la precipitación efectiva (P_e) será:

$$P_e = (5 \text{ mm}) * 0 + (21.1 \text{ mm}) * 0.95 = 20.0 \text{ mm} \quad P_e = 20.0 \text{ mm}$$

Para entender un poco mejor la metodología, supongamos que nos hubieran pedido calcular la precipitación efectiva aplicando esta misma metodología (método del Water Power Resource Service), pero con la variante de que la precipitación al 75% de probabilidad de ocurrencia hubiera sido igual a 161 mm.

Los 161 mm lo colocamos para cada “Incremento de la Precipitación”. Es decir, observando el cuadro anterior, los 161 mm estarán dentro de los rangos del “Incremento de la Precipitación” de los 5 mm, del rango de los 30 mm, del rango de los 55 mm y del rango de los 80 mm. Es decir, los 161 mm los podremos expresar con la siguiente suma de parciales: 161

mm = 5 mm + 30 mm + 55 mm + 71 mm. Los primeros 5 mm tendrán un “% de la Precipitación efectiva” de 0; los siguientes 30 mm, un “% de la Precipitación efectiva” de 95%; los siguientes 55 mm tendrán un “% de la Precipitación efectiva” de 90%; y los últimos 71 mm, un “% de la Precipitación efectiva” de 82%.

Finalmente, el cálculo de la precipitación efectiva (Pe) para este caso específico será de:

$$\begin{aligned} \text{Pe} &= (5 \text{ mm}) * 0 + (30 \text{ mm}) * 0.95 + (55 \text{ mm}) * 0.90 + (71 \text{ mm}) * 0.82 \\ \text{Pe} &= 136.22 \text{ mm} \end{aligned}$$

Problema N°3

Calcular la necesidad de riego de la papa para la zona de Huayao en Huancayo para el mes de Setiembre:

Datos:

Si la evapotranspiración real o actual, ETA = 61.9 mm y la precipitación efectiva, Pe = 20 mm

Solución:

Cálculo de las necesidades de riego de la papa

Haciendo uso de la relación:

$$D_a = \text{ETA} - \text{Pe}$$

Reemplazando valores se tiene:

$$D_a = 61.9 - 20.0 \quad \Rightarrow \quad D_a = 41.9 \text{ mm}$$

Entonces, la papa requiere para el mes de Setiembre, **41.9 mm de lámina de agua.**

4.6 Necesidades de agua de los cultivos

La evapotranspiración actual o real (ETA) es la cantidad de agua que requiere la planta para satisfacer sus necesidades fisiológicas. Sin embargo, dentro de su ambiente, la planta no se encuentra aislada sino que forma parte de un microsistema, sujeto a “entradas” y “salidas de agua”; y, por lo tanto, susceptible de efectuar un balance hídrico, en el que las entradas están dadas por todos los aportes hídricos al suelo y la “salida” por el proceso de agotamiento de la humedad del suelo, ocasionado por la evapotranspiración actual (ETA). En consecuencia, el balance se sintetiza en:

$$D_a = ETA - (Pe + CA + N)$$

Donde:

- D_a** : Necesidad de riego o demanda de agua de los cultivos para el período considerado (mm),
- ETA** : Evapotranspiración real o actual (mm),
- Pe** : Precipitación efectiva (mm),
- CA** : Diferencia de la lámina de la capacidad de almacenamiento del suelo inicial y final del período considerado (mm), y
- N** : Aporte eventual del nivel freático (mm).

El proceso de agotamiento de la humedad del suelo está dado por la evapotranspiración actual (ETA) y el proceso de contribución hídrica por la suma de Pe, CA y N.

El valor de N se considera igual a cero, tanto para condiciones donde no existe influencia del nivel freático, así como en aquellas situaciones donde se puede controlar la ascensión capilar del nivel freático mediante un adecuado sistema de drenaje, capaz de evitar daños físicos al sistema radicular de la planta.

El valor de CA también se considera cero para efectos de planificación de proyectos de irrigación, dado que en éstos, el objeto es conocer la demanda total de agua del proyecto; luego, la demanda de agua de los cultivos quedará expresada por:

$$D_a = ETA - Pe \quad \dots\dots\dots (22)$$

4.7 Demanda de agua del proyecto

En la planificación de proyectos de riego es importante definir el **CÓMO**, **CUÁNTO** y **CUÁNDO** proporcionar la cantidad de agua de riego a la planta.

La respuesta a la primera pregunta cómo, está relacionada directamente con la infraestructura de riego del proyecto; obras de captación, conducción, distribución, medición y el método de aplicación misma del agua de riego al cultivo.

Con respecto a la interrogante **CUÁNTO**, ésta se refiere a la cantidad de agua que se debe captar de la fuente de abastecimiento del proyecto. Para su cálculo, se tiene en cuenta las necesidades del cultivo, la eficiencia de operación de la infraestructura de riego y la eficiencia de aplicación del agua a los cultivos que a su vez está estrechamente ligada a la potencialidad de los recursos humanos y técnicas disponibles para el manejo del agua de riego.

La pregunta **CUÁNDO** aplicar el agua de riego es equivalente a la frecuencia de riego, y su respuesta está condicionada a las características hídricas del suelo, al uso consuntivo de las plantas y a la profundidad de su sistema radicular.

Para el cálculo de la demanda de agua de un proyecto, se debe tener en cuenta todas las pérdidas resultantes del sistema de distribución del agua de riego y de la aplicación del agua al cultivo. La demanda de agua del proyecto (**D_p**) será igual a la necesidad de riego del cultivo (**D_a**) dividida por la eficiencia de riego del proyecto (**E_r**).

$$D_p = \frac{D_a}{E_r} \quad \dots\dots\dots (23)$$

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

Problemas N° 1

Hallar la demanda de agua en m^3/ha del cultivo de papa en el primer mes de su periodo vegetativo (Setiembre) para la zona de Huayao en Huancayo.

Datos:

- Necesidad de riego $D_a = 41.9 \text{ mm}$
- Eficiencia de aplicación $E_a = 50\%$
- Eficiencia de distribución $E_d = 80\%$
- Eficiencia de conducción $E_c = 85\%$

Solución:

Demanda de agua en m^3/ha del cultivo de papa = D_p

La eficiencia de riego (E_r) será:

$$\begin{aligned}E_r &= E_a * E_d * E_c \\E_r &= 0.50 * 0.80 * 0.85 \\E_r &= 0.34\end{aligned}$$

Luego, la demanda de agua del proyecto (D_p) será:

$$D_p = \frac{D_a}{E_r} = \frac{41.9}{0.34} = 123.2 \text{ mm}$$

Para convertirlo a unidades de m^3/ha lo único que tenemos que hacer es multiplicarlo por 10.

$$\begin{aligned}D_p &= 123.2 \text{ mm} * \left[\frac{10,000 \text{ m}^2}{1 \text{ ha}} * \frac{1 \text{ m}}{1,000 \text{ mm}} \right] \\D_p &= 123.2 * \left[\frac{10 \text{ m}^3}{\text{ha}} \right] \Rightarrow \boxed{D_p = 1,232 \frac{\text{m}^3}{\text{ha}}}\end{aligned}$$

Cifra que representa la cantidad de agua de riego por hectárea que se requiere proporcionar a nivel de cabecera del proyecto, para satisfacer las necesidades de agua de la papa para el mes considerado. En forma similar, se puede calcular las necesidades de riego del mismo cultivo para los otros meses de su período vegetativo.

Problemas N°2

Calcular la evapotranspiración real o actual (**ETA**) a partir de la Evapotranspiración potencial según Penman y del k_c según el procedimiento de la FAO para el cultivo de maíz en la ciudad de Tarapoto.

Datos:

La Evapotranspiración potencial según Penman, es el siguiente:

Mes	May	Jun	Jul	Ago	Set
ETP Penman, (mm/día)	8.7	6.7	5.7	5.4	4.7

Ciclo del cultivo: 5 meses de Marzo a Julio: **HR mínima promedio del ciclo:** 50.4%; la **velocidad promedio del viento del ciclo:** 4.1 m/s. **Subdivisión del ciclo vegetativo:** **período inicial:** 20 días; **desarrollo del cultivo:** 40 días; **mediados del periodo:** 55 días; **finales:** 35 días.

Solución:

Calcular la evapotranspiración real o actual (ETA)

- **Cálculo de K_c**

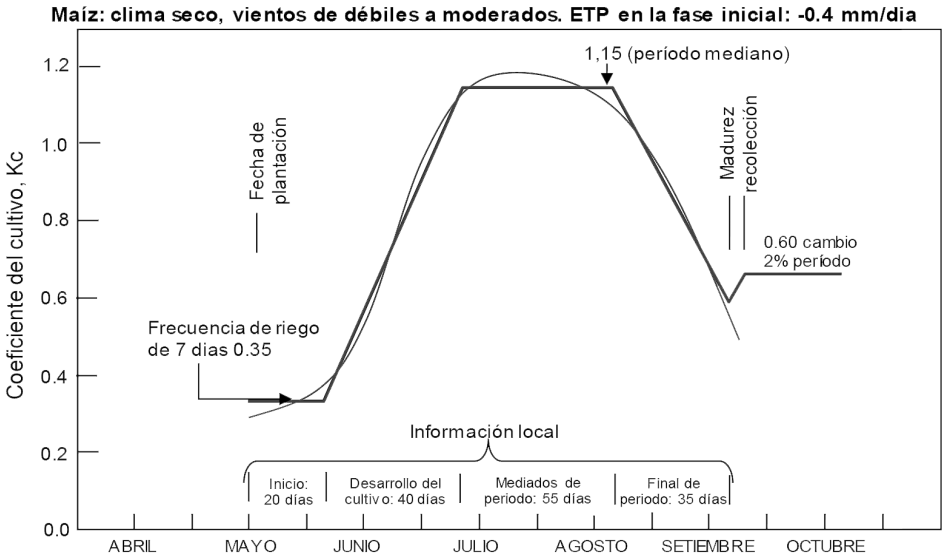
Como el período de siembra (Mayo) es en estiaje, se aplicará un riego cada 7 días; por lo que en la Figura N°17, para $ETP = 8.7$ mm/día, se obtiene $k_c = 0.33$. Los valores de k_c para los períodos 3 y 4 se obtienen del Cuadro N°15, promediando los valores que se dan, para una Velocidad de Viento de 0 – 5 m/s, a fin de reflejar así el efecto de un valor intermedio de la **HR min**; por lo tanto, en el período 3, $k_c = 1.15$; período 4, $k_c = 0.60$.

En la figura siguiente, resultante de los valores de k_c , se obtienen los valores de k_c correspondiente a cada uno de los meses del ciclo por la relación entre el área bajo la curva y la base.

• **Cálculo de ETA**

Para el cálculo de la Evapotranspiración real o actual ETA, se tiene:

ETA = K_c *ETP



Curva de K_c para el maíz

Mes	May	Jun	Jul	Ago	Set
ETP Penman (mm/día)	8.7	6.7	5.7	5.4	
K_c			4.7		
ETA, (mm/día)	0.36	0.81	1.15	1.09	
			0.60		
	3.1	5.4	6.6	5.9	
			2.8		

Problema N°3

Calcular la precipitación efectiva (Pe), según el Método del Servicio de Conservación de Suelos, y la necesidad de riego (D_a), en la zona de Pucallpa correspondiente al período vegetativo del maíz; Setiembre a Enero. La lámina neta de agua a ser aplicada en cada riego es: $d_n = 65$ mm.

Datos:

Precipitación media mensual

Mes	Set	Oct	Nov	Dic	Ene	Total
pp (mm)	15	80	145	273	119	632
ETA (mm/mes)	96	162	195	177	118	748

Solución:

• Cálculo de la precipitación efectiva (Pe)

Para el mes de Octubre, la precipitación media mensual es de 80 mm y la evapotranspiración real = $31 \times 5.4 = 162$ mm. En el Cuadro N°18, se obtiene un valor de Pe de 62.3 mm, que ajustado por el valor del Cuadro N°19, resulta una precipitación efectiva $Pe = 62.3 \times 0.977 = 60.9$ mm $\approx$ 61 mm. En forma análoga, se calculan para los demás meses de período vegetativo, y se obtiene el cuadro siguiente:

Mes	Set	Oct	Nov	Dic	Ene	Total
ETA (mm/mes)	93	167	198	183		727
Pe (mm/mes)	86					434
	13	61	112	167		
	81					

• Cálculo de las necesidades de riego

Según la relación: $D_a = ETA - (Pe + CA + N)$

Al inicio del ciclo, el suelo está seco; pues concluye el periodo de estiaje y se toma $CA = 0$. Igualmente, se considera nulo el aporte capilar $N = 0$.

Por lo tanto:

$$D_a = ETA - PE$$

Mes	Set	Oct	Nov	Dic	Ene	Total
ETA (mm/mes)	93	167	198	183		727
Pe (mm/mes)	86					434
D_a (mm/mes)	13	61	112	167		293
	81					
	80	106	86	16		
	5					

Problema N°4

Calcular, con fines de diseño, la necesidad de riego (D_a) del mes de máxima demanda de agua, teniendo en cuenta que la precipitación y el ascenso capilar representan un aporte sustancial.

Datos:

- Evapotranspiración real o actual, $ETA = 216$ mm (31 días)
- Precipitación Efectiva $Pe = 43$ mm
- Variación del almacenaje de agua en la zona de explotación radical, $CA = 25$ mm.
- Aporte eventual del nivel freático, $N = 65$ mm (suelo de textura media)

Solución:

Cálculo de la necesidad de agua del cultivo (D_a)

De la relación:

$$D_a = ETA - (Pe + CA + N)$$

Remplazando valores se obtiene:

$$D_a = 216 - (43 + 25 + 65) = 83 \text{ mm}$$

Con fines de diseño, se tiene 83 mm para el mes de máxima demanda como su necesidad de riego.

Problema N°5

En una comunidad de Cajamarca, ubicada en los Andes Peruanos, se ha encontrado una quebrada con un caudal de 25 litros por segundo en el mes de Julio. Existen unas parcelas a tres kilómetros de distancia y la altitud del área de riego se encuentra aproximadamente a 3,000 m.s.n.m. La población quiere optar por construir un canal de conducción revestido o en tubería para regar pastos con riego por gravedad o por aspersión. ¿Qué opción Ud. recomendaría para un mayor incremento de área de pasto con el caudal disponible?

Solución:

Datos:

- Quebrada de 25 /s,
- Longitud de conducción 3 km,
- Altitud de 3,000 m.s.n.m,
- Riego de pastos

La evapotranspiración potencial (ETP) a 3,000 m.s.n.m. es de aproximadamente 2.8 mm/día.

Si se tiene las siguientes equivalencias:

$$1 \text{ Ha} = 10,000 \text{ m}^2 \quad ; \quad 1 \text{ día} = 86,400 \text{ sg} \quad ; \quad 1,000 \text{ lt} = 1 \text{ m}^3$$

- La demanda de riego para 1 ha de pasto será el siguiente:

$$\frac{2.8 \text{ mm}}{\text{día}} * \frac{1 \text{ m}}{1,000 \text{ mm}} * \frac{10,000 \text{ m}^2}{1 \text{ ha}} * \frac{1,000 \text{ lt}}{1 \text{ m}^3} * \frac{\text{día}}{86,400 \text{ s}} = 0.32 \text{ lt/s/ha}$$

a) Opción de conducción en tubería y riego por aspersión

Será necesario considerar la demanda de riego de 0.32 lt/s/ha y las eficiencias.

- **Eficiencias**

La eficiencia de conducción del canal entubado (PVC) será 90%.

La eficiencia de distribución y aplicación a nivel parcelario con riego por aspersión es de 70%

Por lo tanto, la eficiencia de riego será $90\% * 70\% = 0.9\% * 0.7\% = 63\%$

Por consiguiente, el caudal requerido por 1 Ha de pasto será:

$$\text{Caudal requerido} = \frac{0.32 \text{ lt/s/ha}}{0.63} = 0.51 \text{ lt/s/ha}$$

- **Área**

Si se tiene disponible 25 lt/s; por lo tanto el área a regar podrá ser de:

$$\text{Área} = \frac{25 \text{ lt/s}}{0.51 \text{ lt/s/ha}} = 49 \text{ has}$$

b) Opción de conducción canal abierto revestido y riego por gravedad

Será necesario considerar la demanda de riego de 0.32 lt/s/ha y las eficiencias.

- **Eficiencias**

En un sistema de riego con canal abierto y riego por gravedad, bien construido, y bien manejado el riego, se considera una eficiencia de alrededor del 40% (en la conducción de agua por un canal revestido se pierde aproximadamente 1 litro/s/kilometro, y en la distribución y aplicación se pierde un 40%). Por lo tanto, el caudal requerido por hectárea en la fuente es de:

$$\text{Caudal requerido} = \frac{0.32 \text{ lt/s/ha}}{0.40} = 0.80 \text{ l/s/ha}$$

- **Área**

Tenemos disponibles 25 lt/s. Por lo tanto, el área a regar será:

$$\text{Área} = \frac{25 \text{ lt/s}}{0.80 \text{ lt/s/ha}} = 31.25 \text{ has}$$

Finalmente:

La opción que incrementa las áreas de riego será la conducción en tubería y riego por aspersión en alrededor de 17.75 has más.

CAPÍTULO V

EFICIENCIA DE RIEGO

En la operación de todo sistema de riego, ocurren pérdidas de agua tanto en el sistema de almacenamiento, conducción, distribución y a nivel parcelario. Se considera al agua como un recurso vital y sumamente escaso. En este sentido, su manejo debe ser eficiente a fin de preservar y conservar dicho recurso para asegurar su sostenibilidad en el tiempo y en el espacio.

En el diseño de un sistema de riego, se debe considerar las pérdidas que ocurren, con el fin de asegurar el abastecimiento adecuado y oportuno de agua para el riego de los cultivos. Los parámetros que a continuación se detallan se utilizan para sistemas de riego por aspersión, goteo o gravedad indistintamente.

5.1 Eficiencia de riego (E_r)

Llamada también eficiencia de riego del proyecto, del distrito de riego, del fundo o del campo de cultivo. Sirve para responder preguntas como ¿Cuál es la demanda de agua del proyecto?, ¿Qué cantidad de agua se aplicará en el riego?, ¿Cuál será la frecuencia entre riegos?, etc.

La eficiencia de riego está dada por la relación entre el volumen de agua evapotranspirada por las plantas y evaporada del suelo (E_{To}) más la cantidad de agua necesaria para mantener una concentración adecuada de sales en el perfil enraizado del suelo (L_{sa}), menos la precipitación efectiva caída (P_e), menos la ascensión capilar producida desde la napa freática

(L_{ac}); por un lado; y, por el otro lado, al volumen de agua derivado o extraído de la fuente de abastecimiento, que puede ser un río, reservorio, un pozo tubular o un manantial para ser usado en el riego (V_{ex}).

Luego, la expresión matemática será:

$$V_a = (ET_o + L_{sa} - L_{ac} - Pe) * \text{Área} \Rightarrow \boxed{E_r(\%) = \frac{V_a}{V_{ex}} (100)} \dots\dots (1)$$

Donde:

$E_r(\%)$: Eficiencia de riego (%).

V_a : Volumen de agua necesario para el cultivo o usado por el cultivo (m^3) ó (mm).

V_{ex} : Volumen de agua extraído o captado de la fuente de abastecimiento (m^3).

La cantidad de agua se expresa en unidades de volumen o en espesor de lámina de agua.

Los componentes de la eficiencia de riego son:

Eficiencia de almacenamiento (E_s), Eficiencia de conducción (E_c), Eficiencia de distribución (E_d), Eficiencia de aplicación (E_a) y Eficiencia de uso del agua del suelo (E_u).

En un sistema de riego con reservorio:

$$\boxed{E_r(\%) = (100) = (E_s * E_c * E_d * E_a * E_u) * 100} \dots\dots\dots (2)$$

En un sistema de riego sin reservorio:

$$\boxed{E_r(\%) = (100) = (E_c * E_d * E_a * E_u) * (100)} \dots\dots\dots (3)$$

A fin de simplificar la determinación de la eficiencia de riego (E_r), no se debe hacer distinción entre canales de conducción y distribución (E_{cd}), por lo tanto se considera sólo un parámetro, es decir:

$$E_r(\%) = (E_s * E_{cd} * E_a * E_u) * (100) \quad , \text{ Sistema con reservorio, y}$$

$$E_r(\%) = (E_{cd} * E_a * E_u) * (100) \quad , \text{ Sistema sin reservorio.}$$

Dado que E_u es difícil de estimar, por lo general no se considera en la ecuación. Por lo tanto, se tiene que:

$$E_r(\%) = (E_s * E_{cd} * E_a) * (100) \quad , \text{ en un sistema con reservorio}$$

$$E_r(\%) = (E_{cd} * E_a) * (100) \quad , \text{ en un sistema sin reservorio.}$$

5.2 Eficiencia de almacenamiento (E_s)

Normalmente, la principal fuente de almacenamiento o aporte a un reservorio es el agua de río que por lo general lleva una importante cantidad de elementos sólidos en suspensión – producto de la erosión del suelo – que al sedimentarse colmatan el reservorio, disminuyendo su capacidad útil. Las pérdidas de agua en un reservorio ocurren por percolación y evaporación. Sin embargo, el agua descargada por el aliviadero del reservorio no se considera como pérdida.

El balance de agua en un reservorio es igual al volumen de agua que ingresa al reservorio, menos el volumen de sedimentos colmatados en el vaso, el volumen de agua descargado por el aliviadero, el volumen de agua evaporado y el volumen de agua percolado.

La eficiencia de almacenamiento (E_s) se calcula mediante la expresión:

$$E_s(\%) = \frac{V_{ex}}{V_o} * (100) \quad \dots\dots\dots (4)$$

Dónde:

V_{ex} : Cantidad de agua extraída del reservorio, y

V_o : Cantidad de agua que ingresa al reservorio.

5.3 Eficiencia de conducción y distribución (E_{cd})

En un sistema de riego, se distinguen 2 tipos de canales: los canales de conducción, que se refieren al canal madre principal y canales laterales, y los canales de distribución, que se refieren a los canales de menor orden hasta nivel parcelario mismo. La evaluación de la eficiencia de conducción y distribución en forma conjunta se efectúa mediante las relaciones que podemos analizar en las ecuaciones 5 y 6 respectivamente:

$$E_c(\%) = \frac{V_{cd}}{V_{ex}} * (100)$$

..... (5) y

$$E_d(\%) = \frac{V_{cc}}{V_{cd}} * (100)$$

..... (6)

Dónde:

E_c : Eficiencia de conducción,

E_d : Eficiencia de distribución,

E_{cd} : Eficiencia de conducción y distribución,

V_{cc} : Cantidad de agua entregada a nivel de cabecera de los campos de cultivos,

V_{ex} : Cantidad de agua extraída del reservorio, y

V_{cd} : Cantidad de agua entregada a los canales de distribución

Otra forma de expresar E_{cd} es la siguiente:

$$E_{cd} = E_c * E_d$$

..... (7)

5.4 Eficiencia de aplicación (E_a)

Esta eficiencia es la que más directamente está relacionada con los agricultores. Está definida por la relación entre el volumen del agua retenida en la zona de raíces y que será utilizada para la evapotranspiración del cultivo (V_1), más el volumen de agua necesario para mantener un balance apropiado de sales en el perfil enraizado (V_2), y el volumen total de agua aplicado en el riego (V_o). Se utilizará V_2 , cuando se tiene agua o suelos con altos contenidos de sales, en caso contrario. $V_2 = 0$. La relación utilizada para determinar E_a , es la siguiente:

$$E_a = \frac{V_1 + V_2}{V_o} \quad \dots\dots\dots (8)$$

Dónde:

- V_1 : Volumen de agua retenida en la zona de raíces,
 V_2 : Volumen de agua aplicada para mantener un balance de sales apropiado en la zona de raíces, y
 V_o : Volumen total de agua aplicado en el riego

5.5 Eficiencia de almacenamiento de agua en el suelo (E_{al})

La determinación de esta eficiencia es más importante realizarla cuando se trata de riego presurizado, puesto que en muchos casos existe la tendencia a efectuar los riegos con menor cantidad de agua que la necesaria, bajo la premisa de que con el riego presurizado se ahorra agua. Aunque, en algunos casos, pueda ocurrir lo contrario. Se debe determinar esa eficiencia cuando se piensa que se aplicó una cantidad de agua menor que la necesaria. Su cálculo se efectúa mediante la relación:

$$E_{al}(\%) = \frac{A_r \cdot (100)}{A_{cc}} \quad \dots\dots\dots (9)$$

Dónde:

- A_r : Cantidad de agua aplicada en el riego, y
 A_{cc} : Cantidad de agua que debe aplicarse con el riego

5.6 Eficiencia de uso del agua por el cultivo (E_w)

La determinación de esta eficiencia es muy importante, ya que permite comparar el uso del agua por los diferentes cultivos. También posibilita la comparación del uso del agua en un mismo cultivo, pero en diferentes momentos o lugares. Esta eficiencia se define mediante la relación:

$$E_w = \frac{R}{v_{ap}} \quad \dots\dots\dots (10)$$

Dónde:

E_w : Eficiencia de uso del agua (Kg de producto / m³ de agua utilizada)

R : Rendimiento del cultivo por hectárea (Kg), y

V_{ap} : Cantidad de agua aplicada al cultivo desde la siembra, hasta la cosecha por hectárea (m³)

El valor de E_w es el mismo que la productividad media del recurso agua que se calcula mediante la función de producción del agua.

En el cuadro N°1, se presenta la eficiencia de uso del agua para una serie de cultivos.

Cuadro N°1.- Eficiencia del uso del agua de algunos cultivos

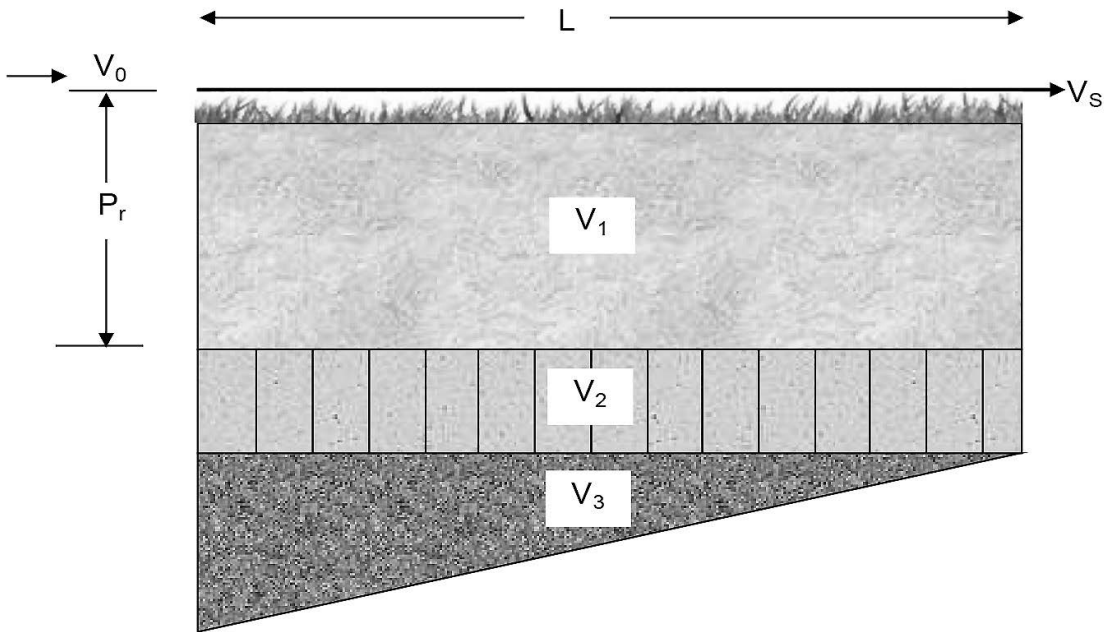
Cultivos	Kg. de agua/kg de materia seca	Cultivos	Kg. de agua/kg de materia seca
Maíz	350 – 400	Avena	550 - 600
Papa	550 – 600	Alfalfa	800 - 850
Frijol	650 – 700	Cebada	500 - 550
Haba	550 – 600	Algodón	550 - 600
Trigo	550 – 600	Garbanzo	600 - 650
Sorgo	300 – 350	Caña de azúcar	300 - 450
Arroz	650 – 700	Remolacha azucarera	350 - 400

5.7 Eficiencia de uso del agua del suelo (E_u)

Esta eficiencia se determina relacionando la evapotranspiración (**ET**) o simplemente la transpiración (**T**) con el volumen de agua almacenado en la zona de raíces ($V_{raíz}$):

$$\boxed{E_u(\%) = \frac{ET*(100)}{V_{raíz}}} \quad \boxed{E_u(\%) = \frac{T*(100)}{V_{raíz}}} \dots\dots\dots (11)$$

Esquemáticamente, se representa en la forma:



Dónde:

V_0 : $V_1 + V_2 + V_3 + V_s$ = Volumen de agua que ingresa a la parcela.

V_s : Volumen de agua que drena fuera del surco, melga o parcela; por escurrimiento superficial.

L : Longitud del surco o melga, y

P_r : Profundidad de raíces.

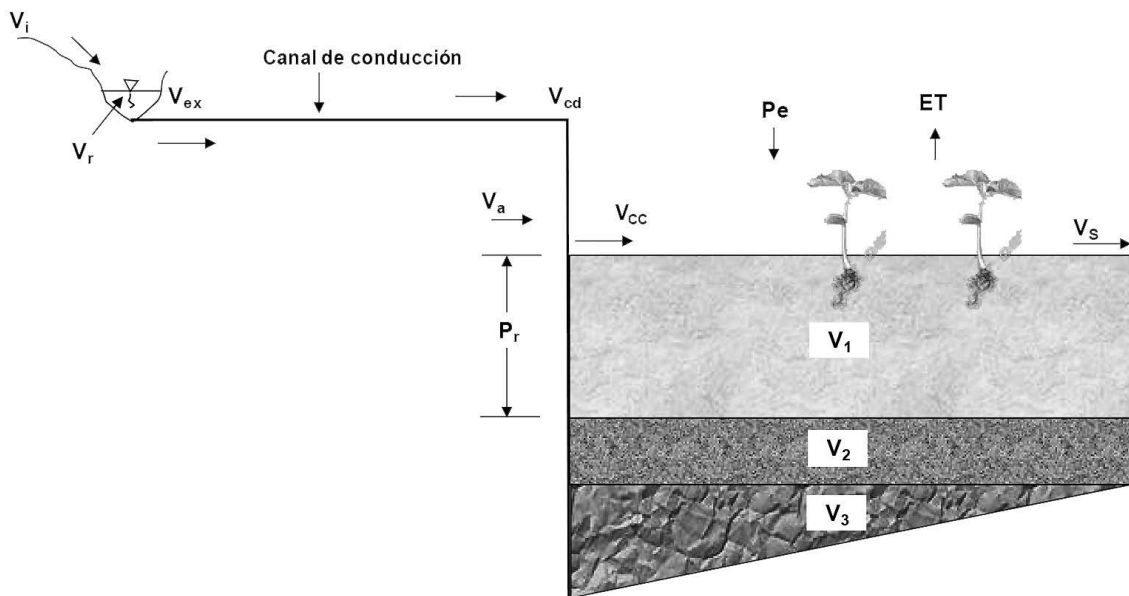
Cuando el riego es por gravedad y se efectúa en surcos cerrados o melgas, $V_s = 0$.

De igual forma, cuando el riego es a presión.

Entre los factores más importantes que influyen en la eficiencia de aplicación (E_a), se tienen:

- Contenido de humedad del suelo,
- Características de infiltración de los suelos,
- Tiempo de riego aplicado,
- Caudal de riego utilizado,
- Destreza del regador u operación del sistema de riego (Factor humano),
- Características hidráulicas de los surcos o melgas,

- Método de riego utilizado,
- Longitud de surco o melga,
- Grado de nivelación o acondicionamiento del terreno, y
- Pendiente longitudinal de los surcos o melgas.



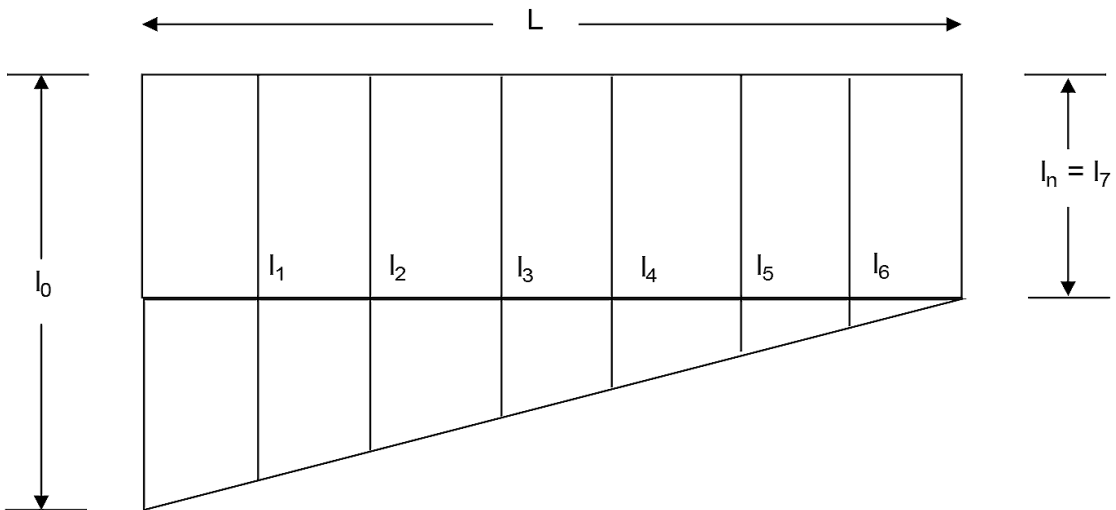
Dónde:

- V_i : Volumen de agua que ingresa al reservorio. Canal de conducción,
- V_r : Volumen de agua almacenado en el reservorio,
- V_{ex} : Volumen de agua extraída del reservorio,
- V_{cd} : Cantidad de agua entregada a los canales de distribución,
- V_a : Cantidad de agua entregada a nivel de parcelario,
- V_{cc} : Cantidad de agua entregada a nivel de cabecera de los campos de cultivo,
- V_1 : Volumen de agua retenida en la zona de raíces,
- V_2 : Volumen de agua aplicado para mantener balance apropiado de sales en la zona de raíces,
- V_3 : Volumen de agua percolada profundamente,
- V_s : Volumen de agua que sale fuera del surco o melga por escurrimiento superficial,
- P_r : Profundidad de raíces,

Pe : Precipitación efectiva, y
ET : Evapotranspiración del cultivo.

5.7.1 Eficiencia de distribución longitudinal (E_{di})

Esta eficiencia se refiere al grado o nivel de uniformidad de humedecimiento del perfil enraizado a lo largo del surco o melga. Ello puede ser medido como profundidad humedecida o como lámina infiltrada a lo largo del surco o melga.



Perfil humedecido a lo largo del surco o melga

La expresión matemática para estimar la eficiencia de distribución de humedecimiento es:

$$E_{di} = \left(1 - \sqrt{\frac{\sum (\bar{I} - I_i)^2}{(n-1)\bar{I}^2}} \right) * 100 \quad \dots\dots\dots (12)$$

Dónde:

E_{di} : Eficiencia de distribución longitudinal o grado de uniformidad de humedecimiento de la zona de raíces (%),
 $\bar{I}$: Lámina infiltrada promedio a lo largo del surco o melga,
 I_i : Lámina infiltrada en el punto i a lo largo del surco,

- n** : Número de datos o puntos de los cuales se conoce su lámina infiltrada acumulada, y
- L** : Largo del surco o melga

5.7.2 Eficiencia de conducción en canales principales (E_{cc})

- Suministro continuo sin una modificación importante del canal . 0.90
- Suministro intermitente en proyectos de 3.00 a 7.00 has y zonas de rotación de 30 a 70 has, con buena administración. 0.80 – 0.85
- Grandes sistemas (mayor de 10,000 has) y sistemas pequeños (menor de 1,000 has) con una comunicación deficiente y una administración menos eficaz 0.50 – 0.70

5.7.3 Eficiencia de conducción en acequias o canales en parcelas (E_{pa})

- Bloques de 20 o más has:

- Sin revestir 0.80
- Revestidas o en tuberías. 0.90 – 0.95

- Bloques de 1 a 20 has:

- Sin revestir 0.60 – 0.75
- Revestidas 0.70 – 0.90

En los cuadros siguientes, se presenta información referente a eficiencias logradas en riego superficial y aspersión. Estos datos pueden ayudar a estimar indicadores de eficiencia con respecto al uso del agua, ya sea para diseñar sistemas de riego o simplemente para estimar demandas de agua para el riego.

Pérdidas de agua promedio según tipo de suelo y componente del sistema de riego por gravedad (%)

Variable	Textura del suelo		
	Ligera	Media	Pesada
1. En el sistema de distribución	20	10	5
2. Escurrimiento superficial	5	20	30
3. Percolación profunda	45	20	10
Total Pérdidas	70	50	45
Eficiencia	30	50	55

Eficiencia en el riego por gravedad (%)

Textura del suelo y topografía	Sistema de riego		
	Melgas	Surco	Melgas en contorno
1. Arenoso			
a) Bien nivelado	40	40 – 50	40
b) Nivelación insuficiente	20 – 30	30	30
c) Quebrado o con pendiente	----	20 – 30	20
2. Media y profundo			
a) Bien nivelado	45 – 55	50 – 60	50 – 55
b) Nivelación insuficiente	35 – 45	30 – 50	30 – 40
c) Quebrado o con pendiente	----	20 – 30	20 – 30
3. Media y poco profundo			
a) Bien nivelado	60	50	45
b) Nivelación insuficiente	40 – 50	35	35
c) Quebrado o con pendiente	30	30	30
4. Pesado			
a) Bien nivelado	50 – 60	50 – 65	40 – 60
b) Nivelado insuficiente	40 – 50	45 – 55	30 – 45
c) Quebrado o con pendiente	20 – 40	25 – 45	20 – 30

Eficiencias de riego en un sistema de aspersión (%)

Lámina de agua aplicada (mm)	Evapotranspiración máxima (mm/día)		
	< 5 mm	5 – 7.5 mm	>7.5 mm
Velocidad del viento promedio: < 6.4 km/h			
25	68	65	62
50	70	68	65
100	75	70	68
125	80	75	70
Velocidad del viento promedio: 6.4 – 16 km/h			
25	65	62	60
50	68	65	62
100	70	68	65
125	75	70	68
Velocidad del viento promedio: 16 – 24 km/h			
25	62	60	58
50	65	62	60
100	68	65	62
125	70	68	65

Durante la operación de las diferentes zonas de riego, es muy importante estimar sistemáticamente la eficiencia total para conocer la cantidad de agua que se está perdiendo. Con fines de priorización de inversiones, es muy importante descomponer la eficiencia total en sus dos componentes principales: la de conducción y la de aplicación. Esta descomposición permite saber dónde están ocurriendo las pérdidas, y así poder canalizar en forma prioritaria las inversiones, bajo el criterio de que se invierta donde se obtenga la mayor rentabilidad.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

Problema N°1

Calcular la eficiencia de aplicación (E_a), las pérdidas por percolación profunda (P_{pp}) y el escurrimiento (P_{es}) como resultado del riego de una parcela de 2.1 ha, perteneciente a un sistema de riego.

Datos:

El caudal afluente es $Q_{af} = 88.8$ /s durante 8 horas

El caudal efluente es $Q_{ef} = 15.5$ /s durante 6.25 horas

La lámina de agua en el suelo antes del riego es de $L_1 = 52$ mm

La lámina de agua en el suelo después del riego es $L_2 = 114$ mm

La evapotranspiración (**ET**) producida en el intervalo de dos días entre ambos muestreos es de 11 mm.

Solución:

Cálculo de la eficiencia de aplicación (E_a)

El cálculo de la eficiencia de aplicación (E_a) se efectúa de la manera siguiente:

$$E_a = \frac{L_n}{L_b}$$

Dónde:

L_n = Lámina neta

L_b = Lámina bruta

La lámina neta (L_n) y la lámina bruta (L_b) están relacionadas de la manera siguiente:

$$L_n = \Delta L + ET \qquad L_b = \frac{Q_{af} * t}{A}$$

$$ET = 11 \text{ mm}$$

$$Q_{af} = 88.8 \text{ l/s}$$

$$\Delta L = L_1 - L_2 \Rightarrow \Delta L = 114 \text{ mm} - 52 \text{ mm} = 62 \text{ mm}$$

$$t = 8 \text{ horas}$$

$$\Delta L = 62 \text{ mm}$$

$$A = 2.1 \text{ ha}$$

Reemplazando valores:

$$L_n = \Delta L + ET$$

$$L_b = \frac{Q_{af} * t}{A}$$

$$L_n = 62 \text{ mm} + 11 \text{ mm} = 73 \text{ mm}$$

$$L_b = \frac{88.8 \frac{\text{l}}{\text{s}} * \frac{1 \text{ m}^3}{1,000 \text{ l}} * 8 \text{ h} * \frac{3,600 \text{ s}}{1 \text{ h}}}{2.1 \text{ ha} * 10,000 \frac{\text{m}^2}{\text{ha}}} = 0.12178 \text{ m}$$

$$\therefore L_b = 0.12178 \text{ m} = \boxed{122 \text{ mm}}$$

Por lo tanto la eficiencia de aplicación será:

$$E_a(\%) = \frac{L_n}{L_b} * 100 = \frac{73 \text{ mm}}{122 \text{ mm}} * 100 = 59.8\% \Rightarrow \boxed{E_a(\%) = 59.8 \%}$$

Cálculo de las pérdidas por percolación (P_{pp})

Se hallará mediante la siguiente relación:

$$P_{pp} = \frac{L_{pp}}{L_{ac}} * 100$$

Donde:

P_{pp} = Pérdida por percolación (%)

L_{pp} = Lámina que representa la percolación, y

L_{ac} = Lámina en la acequia de cabecera del predio

Si se asume que la lámina bruta a nivel predial es igual a la lámina en la acequia de cabecera, entonces será: $L_b = L_{ac}$

La lámina perdida por percolación (L_{pp}) está relacionada de la manera siguiente:

$$L_{pp} = L_b - (L_{ef} + L_n)$$

La lamina bruta (L_b) o lámina a nivel de cabecera (L_{ac}) según el cálculo es de 122 mm y la lámina neta (L_n) 73 mm.

Mediante la siguiente relación se halla la lámina effluente (L_{ef})

$$L_{ef} = \frac{Q_{af} * t}{A}$$

Donde los datos son:

$$Q_{af} = 15.5 \text{ /s}$$

$$t = 6.25 \text{ horas}$$

$$A = 2.1 \text{ ha}$$

Reemplazando, se obtiene:

$$L_{ef} = \frac{15.5 \frac{l}{s} * \frac{1 m^3}{1,000 l} * 6.25 h * \frac{3,600 s}{1 h}}{2.1 ha * \frac{10,000 m^2}{1 ha}} = 0.01660 \text{ m} = 16.6 \text{ mm} \cong 17 \text{ mm}$$

Luego, la lámina de percolación será:

$$L_{pp} = L_b - (L_{ef} + L_n)$$

$$L_{pp} = 122 - (17 + 73) = 32 \text{ mm}$$

Reemplazando valores, se obtendrá la pérdida por percolación:

$$P_{pp} = \frac{L_{pp}}{L_b} * 100 = \frac{32}{122} * 100 = \boxed{26.2\%} \quad \text{Rpta.}$$

Cálculo de las pérdidas por escurrimiento (P_{es})

$$P_{es} = \frac{L_{esc}}{L_{ac}} * 100$$

Donde: L_{esc} = Lámina de agua de escurrimiento, L_{ac} = Lámina en la acequia de cabecera del lote integrante del predio que se está regando.

Si se asume que la condición de lámina bruta a nivel predial es igual a la lámina en la acequia de cabecera, entonces se tendrá: $L_b = L_{ac}$

- La lámina por escurrimiento (L_{esc}) es la última efluente (L_{ef}). Según los cálculos anteriores, se tendrá $L_b = 122$ mm; $L_{esc} = 17$ mm

Reemplazando valores, en la relación de pérdidas por escurrimiento, se obtendrá:

$$P_{esc} = \frac{L_{esc}}{L_b} * 100 = \frac{17}{122} * 100 = \boxed{14\%} \quad \text{Rpta.}$$

Comprobación de eficiencia de aplicación y las pérdidas por percolación profunda y escurrimiento

Con los resultados anteriores se puede comprobar lo siguiente:

Si: $59.8\% + 14\% + 26.2\% = 100\%$

Con lo cual se demuestra que: $E_a(\%) + P_{esc}(\%) + P_{pp}(\%) = 100\%$, que representa a la cantidad de agua aplicada en el riego.

Problema N°2

Calcular el grado de uniformidad del humedecimiento de la zona de raíces (E_{di}) en el riego por melgas. Basado en los tiempos de contacto entre el agua y el suelo, se determinó en diversos puntos a lo largo de la melga la lámina infiltrada, con los resultados siguientes:

Distancia a lo largo de la melga (m)	Lámina infiltrada (mm)	Distancia a lo largo de la melga (m)	Lámina infiltrada (mm)
0	122	160	69
20	119	180	63
40	116	200	75
60	114	220	87
80	106	240	98
100	98	260	104
120	91	280	117
140	83	300	138

Solución:

Cálculo del grado de uniformidad del humedecimiento de la zona de raíces (E_{di}) a lo largo del surco o melga:

El cálculo se efectuará mediante esta relación:

$$E_{di}(\%) = \left(1 - \sqrt{\frac{\sum(\bar{I} - I_i)^2}{(n-1)\bar{I}^2}} \right) * 100$$

Datos:

$I = 100$ mm

$n = 16$

Reemplazando valores en la relación anterior se tiene:

$$E_{di}(\%) = \left(1 - \sqrt{\frac{6,584}{(16-1) * 100^2}} \right) * 100 = 79\%$$

Rpta:

El grado de uniformidad del humedecimiento de la zona de raíces, $E_{di}(\%)$ será de 79%

Problema N°3

Calcular la eficiencia de riego del proyecto (E_r), para el ciclo de riego y para cada mes en particular, de acuerdo a los siguientes datos:

Mes	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Total
ET (mm)	98	123	156	194	174	158	903
Pe (mm)	87	51	24	63	71	54	350
Volumen derivado, (m ³ x 10 ⁶)	7.8	10.6	16.5	15.4	10.4	13.7	74.4

*Media ponderada de los diferentes cultivos del sistema.

Área regada del sistema: 5,200 hectáreas. Los requerimientos de lixiviación representan, aproximadamente, el 10% de la cantidad de agua evapotranspirada y la ascensión capilar es nula.

Solución:

Cálculo de la eficiencia de riego (E_r)

La eficiencia de riego se determinará de la manera siguiente:

$$E_r = \frac{V_a}{V_{ex}} \quad , \text{ también lo podemos expresar como:}$$

$$E_r = \frac{(ET + L_{sa} - Pe) * \text{Área}}{V_{ex}}$$

Considerando el área (A) y el $V_{ex} = L_b * A$, a fin de uniformizar unidades:

$$E_r = \frac{ET * A + L_{sa} * A - Pe * A}{L_b * A}$$

Luego simplificando la relación anterior se transforma en:

$$E_r = \frac{ET + L_{sa} - Pe}{L_b}$$

En consecuencia, para calcular la eficiencia de riego (E_r) para el mes de Marzo necesitamos saber a que es igual ET , L_{sa} , Pe y L_b :

$Pe = 63 \text{ mm}$ (dato del problema: para el mes de Marzo)

$ET = 194 \text{ mm}$ (dato del problema: para el mes de Marzo)

$$L_b = \frac{V_{ex}}{A} = \frac{15.4 * 10^6 \text{ m}^3}{5,200 \text{ has} * \frac{10^4 \text{ m}^2}{1 \text{ ha}}} = 0.2961 \text{ m} = 296.1 \text{ mm}$$

$L_{sa} = (19.4 \text{ mm})(10\%)$ (dato del problema: “Los requerimientos de
 $L_{sa} = (194 \text{ mm})\left(\frac{10}{100}\right)$ lixiviación representan, aproximadamente, el
 $L_{sa} = 19.4 \text{ mm}$ 10% de la cantidad de agua evapotranspirada”)

Reemplazando valores para el mes de marzo será:

$$E_r = \frac{ET + L_{sa} - Pe}{L_b} \Rightarrow E_r(\%) = \left(\frac{194 + 19.4 - 63}{296.1} \right) * 100 = 50.8\%$$

En forma análoga, se calculan las eficiencias de riego (E_r) para los demás meses, obteniéndose:

Mes	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Total
L_b (mm)	150	204	317	296	200	263	1430
L_{sa} (mm)	0.98	12.3	15.6	19.4	17.4	15.8	81.5
E_r (%)	13.9	41.3	46.6	50.8	60.2	45.6	43

Problema N°4

Estimar en forma preliminar, el área factible de riego con un embalse de regulación anual, teniendo en cuenta que el agua a utilizar se almacenará antes de comenzar la época de riego.

Datos:

- Evapotranspiración total ponderada (6 meses) $ET = 750 \text{ mm}$
- Aporte del río al embalse: $13.5 * 10^6 \text{ m}^3$
- Evaporación: $0.98 * 10^6 \text{ m}^3$
- Otras pérdidas: $0.43 * 10^6 \text{ m}^3$
- Precipitación: despreciable
- El suelo del área a regar es profundo, de textura media, plano y con pocas irregularidades microtopográficas. Los métodos de riego se distribuirán porcentualmente así:
 - Melgas rectangulares: 60%
 - Surcos: 25 %
 - Aspersión: 15%
 - ($V = 7.5 \text{ Km/hr}$, lámina de agua a aplicar 50 mm)
 - Eficiencia de conducción $E_c(\%) = 78\%$

Solución:

Cálculo de la eficiencia de riego (E_r)

Si
$$E_r(\%) = \frac{V_a}{V_{ex}} * 100$$

Dónde: $V_a = (ET + L_{sa} - Pe) * \text{Área}$

De las tablas de eficiencia de riego por gravedad y aspersión, se obtiene los valores siguientes:

- **55 %** (E_a en riego en melga, textura de suelo medio profundo y topografía bien nivelado)
 - **60%** (E_a en riego en surco, textura de suelo medio profundo y topografía bien nivelado)
 - **68 %** (Eficiencia de riego por aspersión)
- La eficiencia de aplicación (E_a) como valor medio ponderado de acuerdo a las áreas será:

$$E_a(\%) = (60\%)*(55\%) + (25\%)*(60\%) + (15\%)*(68\%)$$

$$E_a(\%) = (0.60)*(55\%) + (0.25)*(60\%) + (0.15)*(68\%)$$

$$E_a(\%) = 33\% + 15\% + 10.2\%$$

$$E_a = 58.2\%$$

➤ La eficiencia de riego (E_r) será:

$$E_r(\%) = E_a(\%)*E_c(\%)$$

$$E_r(\%) = (58.2\%)*(78\%)$$

$$E_r(\%) = (0.582)* (78\%) = 45.4\%$$

$$E_r = 45.4\%$$

=>

$$E_r = 0.454$$

El volumen a derivar del embalse (V_{ex}) para riego será:

$$V_{ex} = 13.5 * 10^6 \text{ m}^3 - 0.98 * 10^6 \text{ m}^3 - 0.43 * 10^6 \text{ m}^3$$

$$V_{ex} = (13.5 - 0.98 - 0.43)* 10^6 \text{ m}^3 \text{ } \zeta$$

$$V_{ex} = 12.09 * 10^6 \text{ m}^3$$

El agua consumida (V_a) será:

$$V_a = (ET + L_{sa} - Pe)*\text{Área}$$

$$\text{Si, } ET = 750 \text{ mm} ; L_{sa} = 0 ; Pe = 0$$

$$V_a = (750 \text{ mm} + 0 - 0)*\text{Área}$$

$$V_a = (750 \text{ mm})*\text{Área}$$

$$\text{Si, } E_r(\%) = \frac{V_a}{V_{ex}} * 100 \quad \Rightarrow \quad E_r = \frac{V_a}{V_{ex}}$$

Reemplazando valores

$$0.454 = \frac{0.75 \text{ m} * \text{Área}}{12.09 * 10^6 \text{ m}^3}$$

Despejando el “Área” se obtiene: $7'318,480 \text{ m}^2 \approx 732 \text{ has}$

Rpta:

Con el proyecto se estima regar un área aproximada de 732 hectáreas.

CAPÍTULO VI

CALIDAD DEL AGUA DE RIEGO

El desarrollo de la agricultura depende del grado de disponibilidad de agua de buena calidad. Hay aguas que en forma natural no son apropiadas para regar los cultivos, pero también las aguas de buena calidad pueden deteriorarse por acción del hombre. El desarrollo de los pueblos, su crecimiento demográfico, los recientes niveles de pobreza de vastos sectores de la humanidad, entre otros, son factores que influyen en el deterioro de la calidad de las aguas.

Cabe mencionar que cuando el riego no es manejado correctamente a través del tiempo se genera salinización de los suelos. Esta situación se puede corroborar en irrigaciones antiguas y modernas, en las que el rendimiento de los cultivos sufre mermas en la producción agrícola, y en otros casos se pueden observar terrenos totalmente afectados por los problemas de drenaje y salinidad, que para su recuperación, se requerirá ingentes sumas de dinero.

La calidad de las aguas de riego está determinada por la composición y concentración de los diferentes elementos que puedan estar presentes ya sea en forma de solución o en suspensión. También, determina el tipo de cultivo a sembrar; y, en cierta manera, el tipo de manejo que se debe dar al suelo y al riego mismo.

Las características principales que determinan la calidad del agua de riego son:

- La concentración total de sales solubles.
- La concentración relativa de sodio.
- La concentración de elementos tóxicos.
- La concentración total de sólidos en suspensión.
- La presencia de semillas de malezas, larvas o huevos de insectos.
- La dureza del agua, determinada por la concentración de bicarbonatos, entre otros.

El contenido de sales en las aguas de riego ejerce diversos efectos sobre los suelos, tales como:

- Efecto físico directo, al aumentar la presión osmótica y disminuir el potencial hídrico afectando su disponibilidad para la planta.
- Efecto físico indirecto, al dispersar los coloides del suelo y hacer que éste sea menos permeable, y
- Efecto tóxico específico de algunas sales a ciertos cultivos.
- La clasificación de las aguas con fines de riego está en función de varios factores como el cultivo, el suelo, el clima, el manejo y disponibilidad de agua, la capacidad del sistema de drenaje, entre otros. El análisis químico del agua da una idea sobre sus posibilidades de uso, pero la interpretación verdadera debe resultar de la consideración de todos los demás factores.

Los criterios y los sistemas de clasificación han cambiado a través del tiempo, tanto por el avance de la ciencia como por la necesidad de darle una mayor amplitud en el intento de comprender todas las situaciones posibles. Existen muchos métodos de clasificación de las aguas con fines de riego entre los más importantes se tienen: Scofield (1935), Wilcox (1947), Doneen (1959), U.S. Salinity Laboratory (1954) y FAO (1987). En este capítulo, se explicarán los métodos de U.S. Salinity Laboratory (1954) y FAO (1987).

La presencia de semillas de malezas, larvas o huevos de insectos disminuye la calidad del agua. Sin embargo, no es determinante para no usarla, si sus características químicas la hacen aptas para el riego.

6.1 Fisicoquímica de las aguas

6.1.1 Conceptos Básicos

Es necesario conocer las características físicas y químicas del recurso hídrico superficial y subterráneo con fines de riego y otros usos. Esto motiva a recordar algunos conceptos básicos de las propiedades fisicoquímicas de las aguas que son de constante aplicación. A continuación, se mencionan los conceptos de varias maneras de expresar la concentración de los elementos y compuestos químicos (sales) tales como, partes por millón (ppm), peso equivalente (Pe), miliequivalente (meq) y sus relaciones.

- **Partes por Millón (ppm)**

Un elemento o compuesto químico tiene la concentración de X ppm, cuando la solución lleva disuelto X miligramos por litro de solución del elemento o compuesto químico:

$$X \text{ ppm} = X \text{ mg} / l$$

¿Cuántas ppm de ClNa hay en un litro de solución que lleva disuelto 3 g de sal?

Solución:

3 g. de ClNa = 3,000 mg en 1 litro de solución; en consecuencia será igual a:

$3,000 \text{ ppm} = 3,000 \text{ mg/l}$
--

- **Peso Equivalente (P.e.)**

Peso equivalente o simplemente “equivalente” de una sustancia (elementos químicos, ión, sal) es el peso en gramos de esa sustancia que se combina o reemplaza a un gramo químico de hidrógeno. Es igual al peso atómico, elemento o peso del ión o peso molecular de la sal dividido por su valencia.

$$P. e. = \frac{\text{Peso del ión}}{\text{Valencia}} \text{ para un ión} \quad P. e. = \frac{\text{Peso molecular}}{\text{Valencia}} \text{ para una sal}$$

$$P. e. = \frac{\text{Peso atómico}}{\text{Valencia}} \text{ para un elemento químico}$$

Dónde:

PM : Peso molecular ó peso atómico ó peso del ión

V : Valencia

Ejemplo:

Ca: Peso atómico: 40.08

Valencia : 2

$$P. e. = \frac{40.08}{2} = 20.04 \text{ gr}$$

SO₄: Peso molecular: 96.06

Valencia: 2

$$P. e. = \frac{96.06}{2} = 48.03 \text{ gr}$$

ClNa: Peso molecular: 58.45

Valencia: 1

$$P. e. = \frac{58.45}{1} = 58.45 \text{ gr}$$

• Miliequivalente (meq)

Es la milésima parte de un equivalente (elemento químico, ión, sal)

• Número de miliequivalentes (meq/l)

El número de miliequivalentes es el número de meq de una sustancia disuelta en un litro de solución. Cuando la densidad de la solución es igual a la unidad, se cumple:

$$\boxed{\frac{\text{meq}}{\text{p.e.}} = \text{eq}} \dots\dots\dots (1)$$

Eq. por millón. (Número de equivalentes de una sustancia disuelta en un millón de solución expresado en peso)

Entre **meq/l** y **ppm** se cumple la siguiente relación:

$$\frac{\text{ppm}}{\text{p.e.}} = \frac{\text{meq}}{1} \quad \dots\dots\dots (2)$$

En los Cuadros N°1 y N°2, se presentan los pesos atómicos y equivalentes de las sustancias más frecuentes en aguas y suelos.

6.1.2 Conductividad Eléctrica (CE)

Existen muchas formas de expresar la salinidad de una muestra de agua o suelo, una de ellas consiste en expresar la cantidad de sales disueltas en un volumen de solución. Como unidad de medida, se utiliza el **g/** o el número de **meq/l**. Una forma simple de expresar la salinidad de una solución es por medio de su **Conductividad Eléctrica (CE)** o conductancia específica que indica la habilidad de conducir corriente eléctrica; su medición se realiza a 25°C. El valor de la CE se incrementa con la cantidad de sólidos disueltos (TDS) o cuanto mayor sea la concentración de sales. El fundamento de la resistividad se presenta mediante la siguiente relación:

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad \dots\dots\dots (3)$$

Dónde:

- R** : Resistencia (ohm),
- ρ** : Resistividad eléctrica (ohm*cm),
- L** : Longitud del conductor (cm), y
- S** : Área trasversal del conductor (cm²)

La inversa de “**ρ**” se llama conductividad eléctrica, y se expresa por **CE**

$$CE = \frac{1}{\rho} = \frac{L}{R * S} \quad \dots\dots\dots (4)$$

Los peces de agua dulce no pueden sobrevivir con valores de CE mayores de 2 mmhos/cm, ya que estos valores son demasiado altos para su existencia.

Cuanto mayor sea **CE** mayor será la concentración de sales. La inversa de **(1/ohm)** se denomina **mho**, con lo que la cantidad de medida de la **CE** se llama **mho/cm a 25°C** de temperatura. Esta unidad resulta muy grande,

por lo que se utiliza las siguientes:

$\frac{\text{milimhos}}{\text{cm}}$, en forma abreviada se escribe $\frac{\text{mmhos}}{\text{cm}}$, que es igual a la milésima parte de un $\frac{\text{mhos}}{\text{cm}}$,
 $\therefore \frac{\text{mmhos}}{\text{cm}} = 10^{-3} \frac{\text{mhos}}{\text{cm}}$

Un $\frac{\text{micromhos}}{\text{cm}}$, en forma abreviada se escribe $\frac{\mu\text{mhos}}{\text{cm}}$, que es igual a la millonésima parte de un $\frac{\text{mhos}}{\text{cm}}$
 $\therefore \frac{\mu\text{mhos}}{\text{cm}} = 10^{-6} \frac{\text{mhos}}{\text{cm}}$

La conductividad eléctrica en unidades del sistema internacional (S.I) se plantea en $\frac{\text{desisiemens}}{\text{m}}$ que abreviadamente se presenta como **dS/m**, el cual es equivalente a:

$$1 \frac{\text{dS}}{\text{m}} = 1 \frac{\text{mmhos}}{\text{cm}}$$

Cuadro N°1.- Peso atómico de los elementos

Nombre	Símbolo	Peso atómico
Aluminio	Al	26.97
Azufre	S	32.06
Boro	B	10.82
Calcio	Ca	40.08
Carbono	C	12.01
Cloro	Cl	35.457
Cobalto	Co	58.94
Cobre	Cu	63.54
Flúor	F	19.00
Fósforo	P	30.98
Hidrógeno	H	1.008
Hierro	Fe	55.85
Magnesio	Mg	24.32
Manganeso	Mn	54.93
Molibdeno	Mo	95.95
Nitrógeno	N	14.008
Níquel	Ni	58.69
Oxígeno	O	16.000
Potasio	K	39.096
Sodio	Na	22.997
Yodo	I	126.92
Zinc	Zn	65.38

Cuadro N°2.- Peso Equivalente de los Iones

Símbolo químico o fórmula	Peso equivalente en granos	Nombre común
Ca ⁺⁺	20.04	Ion calcio
Mg ⁺⁺	12.15	Ion magnesio
Na ⁺	23.00	Ion sodio
K ⁺	39.10	Ion potasio
Cl ⁻	35.46	Ion cloro
SO ₄ ⁻	48.03	Ion sulfato
CO ₃ ⁻	30.00	Ion carbonato
CO ₃ H ⁻	61.01	Ion bicarbonato
NO ₃ ⁻	62.00	Ion Nitrato
Cl ₂ Ca	55.49	Cloruro de calcio
SO ₄ Ca	68.07	Sulfato de calcio
SO ₄ Ca ₂ H ₂ O	86.09	Yeso
CO ₃ Ca	50.04	Carbonato de calcio
Cl ₂ Mg	47.62	Cloruro de magnesio
SO ₄ Mg	60.19	Sulfato magnésico
CO ₃ Mg	42.16	Carbonato magnésico
ClNa	58.45	Cloruro sódico
SO ₄ Na ₂	71.03	Sulfato sódico
CO ₃ Na ₂	53.00	Carbonato sódico
CO ₃ HNa ₂	84.01	Bicarbonato sódico
ClK	74.55	Cloruro potásico
SO ₄ K ₂	87.13	Sulfato potásico
CO ₃ K ₂	69.10	Carbonato potásico
CO ₃ HK	100.10	Bicarbonato potásico
S	16.03	Azufre
SO ₂	32.03	Bióxido de azufre
SO ₄ H ₂	44.54	Ácido sulfúrico
(SO ₄) ₃ *AL ₂ *18H ₂ O	111.07	Sulfato de aluminio
SO ₄ Fe*7H ₂ O	139.01	Sulfato Ferroso

Otras equivalencias aproximadas:

$$\frac{meq}{l} = 10 \text{ CE} * 10^3 = \frac{milimol}{litro}$$

y también:

$$1 \frac{mmhos}{cm} = 640 \text{ ppm de sales disueltas} = 10 \frac{meq}{l}$$

Relación entre la **CE** y **meq/l**:

$$CE = \frac{\text{Cationes (meq/l)}}{12} = \frac{\text{Aniones (meq/l)}}{12}$$

Una regla práctica de frecuente aplicación es la siguiente: la CE de una solución expresada en mmhos/cm es igual a la concentración de cationes o aniones, en meq/l, dividida por 12.

- **Conductividad eléctrica de diferentes tipos de aguas:**

Muestras	CE a 25°C
Agua de lluvia	0.15 mmhos/cm
Agua media de los ríos	0.2 – 0.4 mmhos/cm
Agua del mar Mediterráneo	63 mmhos/cm
Agua de riego de salinidad media	0.75 – 2.25 mmhos/cm

6.2 Clasificación del agua de riego, según el U.S. Salinity Laboratory

El U.S. Salinity Laboratory, en un esfuerzo que ha tenido gran trascendencia en esta materia, presentó una clasificación de las aguas que consta de un diagrama (Figura N°1) basado en criterios de la **Conductividad Eléctrica (CE)** y la **Relación de Adsorción de Sodio (RAS)**. Seguidamente, se presentan definiciones sobre la concentración total de sales, la concentración relativa de sodio, la concentración de boro y la clasificación del agua de riego.

6.2.1 Concentración total de sales

La concentración total de sales solubles en el agua de riego se expresa en términos de conductividad eléctrica (CE), la misma que puede determinarse en forma rápida y precisa. En forma general, el agua usada en el riego tiene una conductividad eléctrica normalmente menor de 2.00 – 2.25 mmhos/cm. Una conductividad eléctrica del agua de riego menor de 0.75 mmhos/cm es considerada como satisfactoria de agua de riego. Una conductividad eléctrica mayor de 2.25 mmhos/cm ocasiona una sustancial reducción en los rendimientos de muchos cultivos; salvo que se traten de cultivos tolerantes a las sales, en cuyo

caso especial se deberá aplicar abundante agua de riego y el drenaje subterráneo de los suelos deberá ser adecuado.

6.2.2 Concentración relativa de sodio

Junto con el conocimiento de la concentración total de sales, es de gran utilidad el conocimiento de la **proporción relativa de sodio (Na) y cationes divalentes** en el agua de riego, por su efecto sobre la sodificación del suelo. El sodio tiene un efecto dispersante al ser intercambiado por los coloides del suelo, debido a su alta capacidad de hidratación. Un suelo que ha sufrido dispersión por efecto del Na altera su estructura en diferentes grados de intensidad, sellándose ya sea total o parcialmente la superficie del suelo a la infiltración del agua de riego y a un adecuado intercambio gaseoso entre la atmósfera y el perfil del suelo. Se crea, por lo tanto, inapropiadas condiciones para un adecuado desarrollo de los cultivos y afectando consecuentemente sus rendimientos. Un indicador de la concentración relativa de sodio es la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), expresada por:

$$\text{RAS} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\frac{\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}}{2}}} \dots\dots\dots (5)$$

Dónde: $\text{Na}^+, \text{Ca}^{++}, \text{Mg}^{++}$ están expresados en meq/l

La concentración de sodio puede calcularse si se conoce la conductividad eléctrica CE (micromhos/cm) y la concentración de calcio y magnesio, mediante la relación.

$$\text{Na}^+ = (\text{CE} \cdot 10^4) - (\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++})$$

Asimismo, si solo se conoce la concentración de sodio y la conductividad eléctrica, la concentración de calcio y magnesio se calculará mediante la relación:

$$(\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}) = (\text{CE} \cdot 10^4) - \text{Na}^+$$

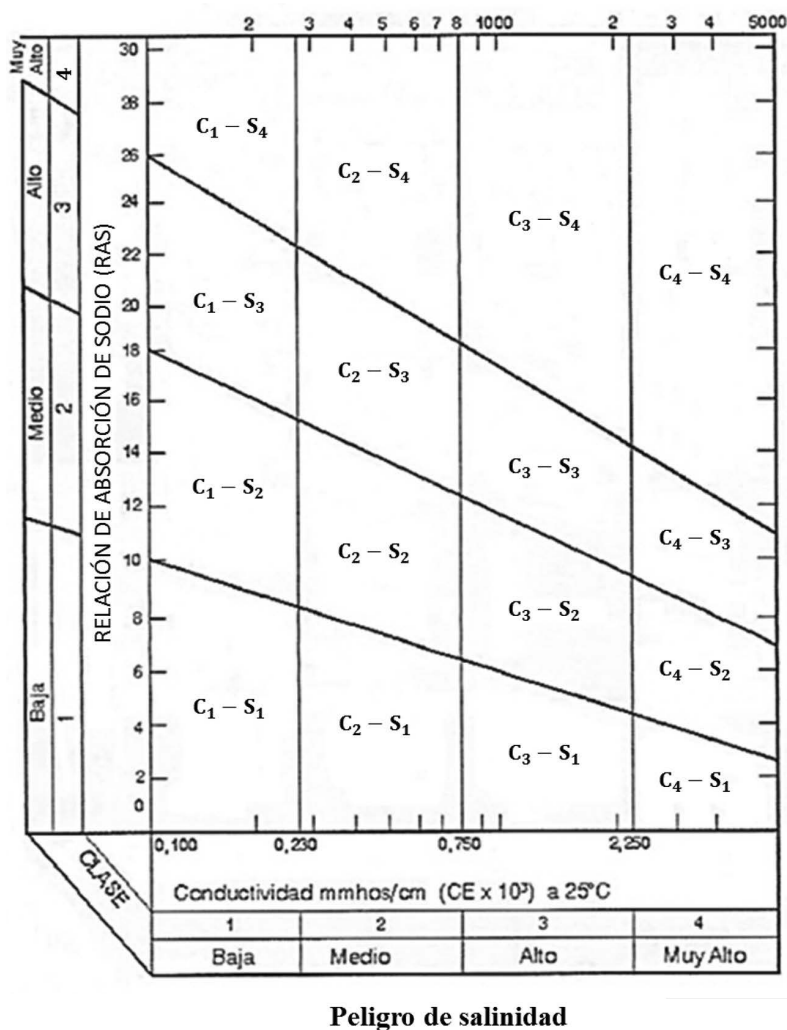


Figura N° 1.- Diagrama para la clasificación de las aguas para riego

6.2.3 Concentración de Boro

El boro se halla presente en el agua de riego en concentraciones que varían desde trazas hasta varias partes por millón. El boro es un elemento esencial para el crecimiento de las plantas, pero se convierte en un elemento tóxico cuando excede a su nivel óptimo, el mismo que se considera entre 0.03 a 0.04 ppm para la mayoría de los cultivos. La tolerancia de los cultivos es variada.

Cuadro N°3.- Límites tolerables de Boro en el agua de riego

CLASE DE AGUA POR CONCENTRACIÓN DE BORO	CULTIVOS		
	SENSIBLES (ppm)	SEMI TOLERANTES (ppm)	TOLERANTES (ppm)
1	0.33	0.67	1.00
2	0.33 – 0.67	0.67 – 1.33	1.00 – 2.00
3	0.67	1.33 – 2.00	2.00 – 3.00
4	1.25	2.50	3.75

Fuente: U.S. Salinity Laboratory. 1954

6.2.4 Clasificación del agua de riego

Para hacer uso de la Figura N°1, se consideran los valores de la conductividad eléctrica del **agua –CE (micromhos/cm)– y de la RAS**. Cada clase de calidad de agua ubicada en la tabla se designa con una doble serie de símbolos. **C** para la concentración de sales y **S** para el sodio. El significado e interpretación de las diferentes clases se resumen a continuación:

- Conductividad eléctrica (CE)

1. **Clase C₁**: Agua de baja salinidad. Puede utilizarse para el riego en la mayoría de los cultivos y en cualquier tipo de suelo. Se tiene poca probabilidad de que se desarrolle salinidad. La CE, varía entre 0 – 250 micromhos/cm.
2. **Clase C₂**: Agua de salinidad media. Puede utilizarse, siempre y cuando haya un cierto grado de lavado, las plantas moderadamente tolerantes a las sales pueden producir adecuadamente en casi todos los casos y sin necesidad de prácticas de control de salinidad. La CE varía entre 250 – 750 micromhos/cm.
3. **Clase C₃**: Agua con alta salinidad. Puede utilizarse en el riego de cultivos tolerantes a las sales y en suelos con adecuado drenaje y en muchos casos se completa con el empleo de prácticas de control de la salinidad. La CE varía entre 750 y 2,250 micromhos/cm.

4. **Clase C₄:** Agua con muy alta salinidad. Puede utilizarse para el riego bajo cuidados especiales: suelos permeables y de drenaje adecuado, aplicándose agua en exceso para mantener un equilibrio de sales en el perfil del suelo. Bajo condiciones normales, no es apropiada para el riego. Los cultivos a usarse con este tipo de agua son los altamente tolerantes a las sales. La CE es superior a 2,250 micromhos/cm.

- Sodio (RAS)

1. **Clase S₁:** Agua baja en sodio. Puede utilizarse para el riego de la mayoría de los cultivos y en la mayoría de los suelos, con poca probabilidad de alcanzar niveles peligrosos de sodio intercambiable. **El valor RAS varía entre 0 – 10.**
2. **Clase S₂:** Agua media en sodio. Puede utilizarse en suelos de textura gruesa o en suelos orgánicos de buena permeabilidad. En suelos de textura fina, el sodio representa un peligro considerable, más aún, si dichos suelos poseen una alta capacidad de intercambio de cationes, especialmente bajo condiciones de lavado deficiente, salvo que el suelo contenga yeso. **El valor de RAS, varía entre 10 – 18.**
3. **Clase S₃:** Agua alta en sodio. Normalmente, puede producir niveles tóxicos de sodio intercambiable en la mayoría de los suelos, por lo que éstos requieren prácticas especiales de manejo, buen drenaje, fácil lavado y adiciones de materia orgánica. Los suelos con abundante cantidad de yeso pueden en muchos casos no desarrollar niveles perjudiciales de sodio intercambiable cuando son regados con esta clase de agua. En otros casos, se utiliza mejoradores químicos para sustituir al sodio intercambiable, que muchas veces no resulta económico si se usa agua de alto contenido de sales. **El valor de RAS varía entre 18 – 26.**
4. **Clase S₄:** Agua muy alta en sodio. Es inadecuada para el riego, salvo que su CE sea baja o media y cuando la disolución del calcio del suelo y/o la aplicación de yeso u otros mejoradores químicos no hagan antieconómica su utilización. **El valor de RAS es mayor de 26.**

Cuadro N°4.- Directrices para interpretar la calidad de las aguas para el riego

Problema potencial	Unidades	Grado de restricción de uso		
		Ninguna	Ligera a moderada	Severa
Salinidad (afecta disponibilidad de agua para cultivo) ²				
Eca	ds/m	<0.7	0.7 – 3.0	>3.0
TSS	mg/l	<450	450 – 2,000	>2,000
Infiltración (reduce infiltración) ; evaluar usando a la vez la Eca y el RAS³				
RAS = 0 – 3 y Eca =		>0.7	0.7 – 0.2	<0.2
RAS = 3 – 6 y Eca =		>1.2	1.2 – 0.3	<0.3
RAS = 6 – 12 y Eca =		>1.9	1.9 – 0.5	<0.5
RAS = 12 – 20 y Eca =		>2.9	2.9 – 1.3	<1.3
RAS = 20 – 40 y Eca =		>5.0	5.0 – 2.9	<2.9
Toxicidad de Iones específicos (afecta cultivos sensibles)				
Sodio (Na) ⁴				
riego por superficie	RAS	<3	3 – 9	>9
riego por aspersión	meq/l	<3	>3	
Cloro (Cl) ⁴				
riego por superficie	meq/l	<4	4 – 10	>10
riego por aspersión	meq/l	<3	>3	
Boro (B) ⁵ (Cuadro N°6)	mg/l	<0.5	0.5 – 4.0	>4.0
Oligoelementos (Cuadro N°7)	mg/l	<0.7	0.7 – 3.0	>3.0
Varios (afecta cultivos sensibles)				
Nitrógeno (NO ₃ – N) ⁶ (aspersión foliar únicamente)	mg/l	<5	5.0 – 30	>30
pH	Amplitud normal 6.5 – 8.4			

1. Fuente: University of California Committee of Consultants 1974. Citado por FAO, 1987
2. Eca es la conductividad eléctrica del agua: medida de la salinidad, expresada en decisiémenes por metro a 25°C (ds/m), o en millimhos por centímetro a 25°C (mmhos/cm). Las dos medidas son equivalentes. TSS es el total de sólidos en solución expresado en miligramos por litro (mg/l).
3. RAS es la relación de absorción de sodio, algunas veces representada como Rna.

Para un valor determinado del RAS, la velocidad de infiltración aumenta a medida que aumenta la salinidad.

4. La mayoría de los cultivos y plantas leñosas son sensibles al sodio y al cloro; en el caso de riego por superficie úsense los valores indicados. La mayor parte de los cultivos anuales no son sensibles; para ellos úsense las tolerancias de salinidad dadas en el Cuadro N°5. En el caso de riego por aspersión sobre el follaje, y humedad relativas por debajo del 30%, el sodio y el cloro pueden ser absorbidos por las hojas de cultivos sensibles.
5. Para las tolerancias al boro, ver Cuadro N°6
6. No es el nitrógeno en forma de nitrato; expresado en términos de nitrógeno no elemental (en el caso de aguas residuales incluir el $\text{NH}_4\text{-N}$ y el N- orgánico)

Se debe tener en cuenta, cuando se usan aguas de las clases $\text{C}_1\text{-S}_3$ ó $\text{C}_1\text{-S}_4$, que el agua de riego puede disolver grandes cantidades de calcio presente en suelos calcáreos, disminuyendo de esta manera notablemente el peligro de sodio. El estado del sodio de las aguas $\text{C}_1\text{-S}_3$, $\text{C}_1\text{-S}_4$ y $\text{C}_2\text{-S}_4$ se puede modificar ventajosamente, adicionando yeso al agua. Asimismo, se recomienda aplicar periódicamente yeso al suelo cuando se utilizan aguas de clases $\text{C}_2\text{-S}_3$ y $\text{C}_3\text{-S}_2$.

El propósito del presente capítulo es explicar los efectos de la calidad del agua de riego en los cultivos y en los suelos. Al mismo tiempo, pretende ayudar en la selección de las alternativas de manejo para afrontar los problemas de calidad que puedan ocasionar la disminución del rendimiento de los cultivos.

6.3 Evaluación de la calidad del agua de riego según la FAO

Los problemas respecto a la calidad del agua de riego son variables en cuanto al tipo e intensidad. Éstos dependen del suelo, clima y de las técnicas especiales de manejo del sistema agua-suelo-planta por parte de los usuarios.

Los problemas pueden identificarse sobre la base de: salinidad, infiltración del agua, toxicidad de iones específicos, contaminantes biológicos y problemas varios (ver Cuadro N°4). A continuación, se presenta una breve descripción de los problemas antes enunciados.

6.3.1 Salinidad

La disponibilidad de agua para el cultivo se ve disminuida por la presencia de sales en el agua de riego y en el suelo mismo, a tal grado que pueden causar problemas de bajo rendimiento en la producción agrícola. Esto se debe a que el contenido de sales en la solución del suelo es de magnitud tal que no permite la extracción del agua por parte de los cultivos. Éstos, en estas condiciones, sufren un déficit hídrico; debido al alto potencial osmótico que generan las sales. En el Cuadro N°5, se muestra la tolerancia de la salinidad para cultivos de fibra, forrajeros, hortalizas y frutas en total se menciona a 92 cultivos.

6.3.2 Infiltración del agua

Cuando existen cantidades fuera de los límites permisibles de sodio y bajas cantidades de calcio en el suelo y en el agua de riego, la velocidad de infiltración se ve disminuida produciéndose en el suelo falta de aire y una baja permeabilidad lo que afecta el rendimiento de los cultivos. Los elementos que influyen en la infiltración del agua en el suelo son el contenido de sales y de sodio en relación a las concentraciones presentes de calcio y magnesio. Se sabe que una alta salinidad incrementa la velocidad de infiltración, pero una proporción alta de sodio sobre el calcio la disminuye. Esto no quiere decir que hay que preferir que la salinidad del suelo sea alta. Debe tenerse en cuenta que la salinidad y la proporción de sodio pueden actuar al mismo tiempo.

6.3.3 Toxicidad de iones específicos

Los problemas de toxicidad en la planta se deben a la absorción de Iones importantes como son: cloro, sodio, boro. Cuando estos son absorbidos por la planta, algunas veces se acumulan hasta sobrepasar las concentraciones límites permisibles; y son los responsables de daños tales como quemaduras foliares, necrosis, defoliación, corrugación foliar, manchas foliares y reducción en los rendimientos de los cultivos. Éstos daños dependen de la cantidad de iones absorbidos y de la sensibilidad de los cultivos. En el Cuadro N°6, se puede apreciar la tolerancia del boro para 57 cultivos.

Además de los iones mencionados existen otros oligoelementos tales como: **Al, As, Be, Cd, Co, Cr, Cu, F, Fe, Li, Mn, Mo, Ni, Pb, Se, Sn, Ti, W, V y el Zn** que también son tóxicos para las plantas en concentraciones mayores a las permisibles. En el Cuadro N°7, se pueden apreciar los límites permisibles para estos oligoelementos.

6.3.4 Contaminantes biológicos

Es de vital importancia incluir esta variable para el análisis de la calidad del agua, especialmente cuando se utiliza agua residual tratada para el riego de los cultivos; ya que ésta contiene una gran cantidad y variedad de microorganismos patógenos causantes de muchas enfermedades del ser humano. Se pueden mencionar entre estos microorganismos patógenos los protozoos, helmintos, bacterias y virus.

Las bacterias son los microorganismos que más abundan en las aguas residuales. De todas ellas, las que más llaman la atención son las enterobacterias. En estas aguas, también hay otras bacterias, hongos y algas.

Ante esto, en el análisis biológico de esta agua, el objetivo será especificar una calidad de agua aceptable, que garantice su idoneidad para el riego de los cultivos y en la cual se hayan reducido los microorganismos a cantidades que no representen peligro para la salud humana.

Según la derogada Ley General de Aguas (DL. 17752), del Perú, para las aguas de riego de vegetales de consumo crudo y bebida de animales (Tipo III); los límites bacteriológicos son los siguientes:

- a. Número más probable (NMP) de organismos coliformes: promedio mensual inferior a 5,000 por cada 100 mil.
- b. Número más probable (NMP) de organismos fecales: hasta 1,000 por cada 100 mil.

6.3.5 Problemas varios

Pueden citarse otros problemas que con frecuencia se presentan, y están en relación con la calidad del agua de riego. Éstos son altas concentraciones de nitrógeno, lo que puede provocar un excesivo crecimiento vegetativo y retraso en la maduración de los frutos; las altas concentraciones de bicarbonatos, yeso, hierro, que puede causar manchas en las hojas y frutos, también corrosión y taponamiento de tuberías; un pH anómalo o fuera del intervalo 6.5 y 8.4 podría indicar la presencia de un ión tóxico o una mala calidad de agua, un pH bajo puede causar corrosión en las tuberías y equipos de riego.

Cuadro N°5.- Tolerancia de la salinidad a los diferentes cultivos

Tolerantes (16 – 21 dS/m)		Moderadamente Tolerantes (10.5 – 16 dS/m)	
Cultivos de fibra, Semilla o Azúcar		Cultivos Forrajeros y Granos	
Algodón	Gossypium hirsutum	Trigo forrajero	Triticum aestivum
Cebada	Hordeum Vulgare	Cebada forrajera	Hordeum Vulgare
Jojoba	Simondsia chinensis	Gramma canaria	Phalaris arundinacea
Remolacha Azucarera	Beta vulgaris	Trébol de cuernos	Lotus corniculatus
Cultivos Forrajeros y Gramas		Hortalizas	
Gramma alcalina	Puccinellia airoides	Alcachofa	Helianthus tuberosus
Gramma de Bermuda	Cynodon dactylon	Beterraga	Beta Vulgaria
Gramma salada	Distichlis stricta	Calabaza Zapallito	Cucubita pero
Hortalizas		Cultivos frutales	
Espárrago	Asparaguas officinalis	Piña	Anana comosus
		Azufaito	Zizifus jujuba
		Granado	Pumica granatum
		Higuera	Ficus carica
		Olivo	Olea europea
		Papaya	Carica papaya
		Cultivos de Fibra, Semilla o Azúcar	

		Avena	Avena sativa
		Cártano	Carthamus tinctorius
		Caupes	Vigna unguiculata
		Centeno	Secale cereale
		Sorgo	Sorghum bicolor
		Soya	Glycine max
		Trigo	Triticum aestivum
		Trigo duro	Triticum turgidum
Moderadamente Sensibles (5 – 10.5 dS/m)		Sensible (0 – 5 dS/m)	
Cultivos de Fibra, Semilla o Azúcar		Cultivos de Fibra, Semilla o Azúcar	
Arroz	Oriza sativa	Ajonjolí, sésamo	Sesamun inducum
Caña de azúcar	Saccharum officinarum	Frijoles	Phaseolus vulgaris
Girasol	Heloanthus annuus		
Habas	Vicia faba	Hortalizas	
Lino	Linum usitatissimum	Cebolla	Allium cepa
Maíz	Zea mays	Frijol	Phaseolus vulgaris
Maní	Arachis hypogaea	Zanahoria	Daucus carota
Ricino	Ricinus communis		
Cultivos Forrajeros y Gramas		Cultivos Frutales	
Alfalfa	Medicago sativa	Palta	Persea americana
Avena forrajera	Avena sativa	Albaricoque	Prumus armeniaca
Gramas de avena alta	Arrhenatherum	Almendro	Prumus dulcis
Gramas Azul	Bouteloua gracilis	Caqui	Diospyros virginiana
Maíz forrajero	Zea mays	Cerezo	Prunus besseyi
		Guinda	Prunus avium
		Chirimoya	Anona cherimola
Hortalizas		Ciruelos	Prunus domestica
Apio	Apium graveolens	Franguezos	Rubus idaeus
Camote	Ipomoea batatas	Fresa	Fragaria sp.
Berengena	Solanum melongena		
Brócoli	Brassica oleracea	Lima, agria	Citrus reticulata
Zapallo	Cucurbita pepo	Limonero	Citrus limón
Repollo	B. oleracea capitata	Mandarina	Citrus reticulada
Coliflor	B. oleracea botrytis	Mango	Mangifera indica
Espinaca	Spinacia oleracea	Manzano	Passiflora edulis

Lechuga	<i>Latuca sativa</i>	Maracuyá	<i>Passiflora edulis</i>
Maíz	<i>Zea mays</i>	Melocotonero	<i>Prunus persica</i>
Melón	<i>Cucumis melo</i>	Naranja	<i>Citrus sinensis</i>
Nabo	<i>Brassica eapa</i>	Níspero	<i>Eriobotrya</i>
Papa	<i>Solanum tuberosum</i>	Peral	<i>Pyrus communis</i>
Pepino	<i>Cucumis sativus</i>	Pomarrosa	<i>Syzygium jambos</i>
Ají	<i>Capsicum annum</i>	Pomelo	<i>Citrus maxima</i>
Rábano	<i>Raphanus sativus</i>	Toronja	<i>Citrus paradisi</i>
Sandía	<i>Citrullus lanatus</i>		
Tomate	<i>Lycopersicon esculentum</i>		
Cultivos Frutales			
Vid	<i>Vitis sp.</i>		

Cuadro N°6.- Tolerancia relativa al boro de algunos cultivos

Muy Sensibles (<0.5 mg /l)		Moderadamente Sensibles (1.0 – 2.0 mg/l)	
Limonero	<i>Citrus limón</i>	Pimiento, ají	<i>Capsicum annum</i>
Zarzamora	<i>Rubus spp</i>	Guisante, arveja	<i>Pisum sativa</i>
		Zanahoria	<i>Daucus carota</i>
Sensibles (0.5 – 0.75 mg/l)		Rabanito	<i>Raphanus sativus</i>
Aguacate	<i>Persea americana</i>	Papas, patatas	<i>Solanum tuberosum</i>
Pomelo, toronja	<i>Citrus X paradisi</i>	Pepino	<i>Cucumis sativus</i>
Naranja	<i>Citrus sinensis</i>		
Albaricoquero	<i>Prunus armeniaca</i>	Moderadamente Tolerantes (2.0 – 4.0 mg/l)	
Melocotonero	<i>Prunus persica</i>	Lechuga	<i>Lactuca sativa</i>
Cerezo	<i>Prunus avium</i>	Repollo	<i>Brassica oleracea capitata</i>
Ciruelo	<i>Prunus domestica</i>	Apio	<i>Apium graveolens</i>
Caqui	<i>Diospyros kaki</i>	Nabo	<i>Brassica rapa</i>
Higuereta	<i>Ficus carica</i>	Pasto azul	<i>Poa pratensis</i>
Vid	<i>Vitis vinífera</i>	Avena	<i>Avena sativa</i>
Nogal	<i>Juglans regia</i>	Maíz	<i>Zea mays</i>
Pecana	<i>Carya illinoensis</i>	Alcachofa	<i>Cynara scolymus</i>
Caupis	<i>Vigna unguiculata</i>	Tabaco	<i>Nicotina tabacum</i>
Cebolla	<i>Allium cepa</i>	Mostaza	<i>Brassica juncea</i>
		Trébol dulce	<i>Melilotus indica</i>
Sensibles (0.75 – 1.0 mg/l)		Calabaza, zapallo	<i>Cucurbita pepo</i>
Ajo	<i>Allium sativum</i>	Melón	<i>Cucumis melo</i>

Camote, batata	<i>Ipomea batatas</i>		
Trigo	<i>Triticum aestivum</i>	Tolerantes (4.0 – 6.0 mg/l)	
Cebada	<i>Hordeum vulgare</i>	Sorgo	<i>Sorghum bicolor</i>
Girasol	<i>Helianthus annuus</i>	Tomate	<i>Lycopersicon lycopersicum</i>
Frijol chino	<i>Vigna radiata</i>	Alfalfa	<i>Medicago sativa</i>
Ajonjolí	<i>Sesamum indicum</i>	Veza	<i>Vicia benghalensis</i>
Lupino altramuz	<i>Lupinus hartwegii</i>	Perejil	<i>Petroselinum crispum</i>
Fresa frutilla	<i>Fragaria spp</i>	Beterraga	<i>Beta vulgaris</i>
Alcachofa	<i>Helianthus tuberosus</i>	Remolacha azucarera	<i>Beta vulgaris</i>
Frijoles	<i>Phaseolus vulgaris</i>		
Pallar, judía lima	<i>Phaseolus lunatus</i>	Muy Tolerantes (6.0 – 15.0 mg/l)	
Mani cacahuete	<i>Arachis hypogaea</i>	Algodón	<i>Gossypium hirsutum</i>
		Espárrago	<i>Asparagus officinalis</i>

Fuente: Mass (1984)

Según la Ley General de Aguas del Perú (Cuadro N° 8), para las aguas de riego de vegetales de consumo crudo y bebida de animales (Tipo III), los límites de **Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)** y **Oxígeno Disuelto (OD)** es de 15 mg/l y 3 mg/l, respectivamente. En el Cuadro N°8, se pueden apreciar los límites permisibles para los compuestos físicos, químicos y biológicos para los diferentes niveles de calidad de aguas.

Estas aguas podrían tener las siguientes características de concentración radiactiva máxima: actividad, Alfa 3 pCi/l y Beta 30 pCi/l. Además, no debe haber presencia de residuo flotante alguno.

Concentraciones máximas toleradas en el agua del suelo o extracto de saturación, sin pérdida de rendimiento o reducción en el crecimiento. Las concentraciones máximas en el riego son aproximadamente igual a las indicadas o ligeramente inferiores. Las tolerancias varían con el clima, condiciones del suelo y con las variedades de los cultivos.

Cuadro N°7.- Concentraciones máximas de oligoelementos recomendables para el riego

Elementos	Concentración	Características
Al (aluminio)	5.00	Puede volver improductivos suelos ácidos ($\text{pH} < 5.5$); pero en suelos con $\text{pH} > 7$ el Al precipita y elimina la toxicidad.
As (arsénico)	0.10	El nivel tóxico varía ampliamente en las plantas desde 12 mg/l para algunos pastos de hasta menos de 0.05 mg/l para el arroz.
Be (berilio)	0.10	El nivel tóxico para las plantas varía ampliamente desde 5 mg/l para la col rizada hasta 0.5 mg/l para los frijoles.
Cd (cadmio)	0.01	Tóxico para los frijoles, remolacha y nabo en concentraciones tan bajas como el 0.1 mg/l en soluciones nutritivas. Se recomienda límites bajos debido a su crecimiento potencial en suelos y plantas peligrosos para seres humanos.
Co (cobalto)	0.05	Tóxico para las plantas de tomate a 0.1 mg/l en soluciones nutritivas. Tiende a inactivarse en suelos neutros y alcalinos.
Cr (cromo)	0.10	Generalmente no se reconoce como esencial. Valores bajos recomendados por falta de conocimiento sobre su toxicidad.
Cu (cobre)	0.20	Entre 0.1 a 1.0 mg/l es tóxico para ciertas plantas en soluciones nutritivas.
F (flour)	1.00	Inactivado por suelos neutrales y alcalinos.
Fe (hierro)	5.00	No es tóxico en suelos con buena aeración; contribuye a la acidez y a la indisponibilidad del fósforo y del molibdeno. La aspersión puede causar depósitos blancos en hojas, etc.
Li (litio)	2.50	Tolerable por muchos cultivos hasta 5 mg/l; móvil en el suelo. Tóxico para cítricos en concentraciones < 0.075 mg/l. Actúa en forma similar al boro.
Mn (manganeso)	0.20	Por lo general tóxico solo en suelos ácidos desde unas cuantas décimas hasta unos pocos gm/l.
Mo (molibdemo)	0.01	En concentraciones normales no es tóxico para las plantas pero lo puede ser para el ganado alimentado con pastos cultivados en suelos con alto contenido de Mo.
Ni (níquel)	0.20	Entre 0.5 y 1.0 mg/l, tóxico para ciertas plantas; su toxicidad es reducida en medios de $\text{pH} > 7.0$
Pb (plomo)	5.00	En altas concentraciones, puede inhibir crecimiento celular.

Se (selenio)	0.02	Tóxico para las plantas en concentraciones tan bajas como 0.025 mg/l, también lo es para el ganado alimentado con pastos cultivados en suelos con niveles relativamente altos de Se. Esencial para animales pero en concentraciones muy bajas.
Sn (estaño)	—	Las plantas lo rechazan en forma eficaz; su tolerancia específica es desconocida.
Ti (titanio)	—	Comportamiento similar al estaño.
W (tungsteno)	—	Comportamiento similar al estaño.
V (vanadio)	0.10	Tóxico para muchas plantas a niveles relativamente bajos.
Zn (Zinc)	2.00	Tóxico para muchas plantas a muy variadas niveles de concentración: su toxicidad es reducida con $Ph > 6$ y en suelos de textura fina y en los orgánicos.

- Fuente: National Academy of Science (1992) y Pratt (1972), citado por FAO 1987.
- Estas concentraciones máximas se basan en una aplicación de agua de 10,000 m³/ha/año. Si el riego excede esta cantidad las concentraciones deben ser corregidos si no lo excede, esta corrección no es necesaria. Los valores son para un consumo continuo de agua en un mismo lugar.

Cuadro N°8.- Calidad de agua y los límites permisibles

Niveles de calidad de agua de acuerdo con la ley general de aguas							
Parámetro	Unidad	Uso de cursos de agua (*)					
		I	II	III	IV	V	VI
Límites bacteriológicos							
Coliformes Totales ⁽¹⁾	NPM/100 ml	8.8	20,000	5,000	5,000	1,000	20,000
Coliformes Fecales ⁽¹⁾	NPM/100 ml	0	4,000	1,000	1,000	200	4.000
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y niveles de Oxígeno Disuelto (OD)							
OD	mg/l	5	3	3	3	5	4
DBO ⁽²⁾	mg/l	5	5	15	10	10	10
Demandas de sustancias potencialmente peligrosas							
Selenio	mg/l	0.01	0.01	0.05	--	0.005	0.01
Mercurio	mg/l	0.002	0.002	0.01	--	0.0001	0.0002

P.C.B	mg/l	0.001	0.001	--	0.002	0.002
Esteres Estalatos	mg/l	0.0003	0.0003	0.0003	--	0.0003
Cadmio	mg/l	0.01	0.01	0.05	--	0.0002
Cromo	mg/l	0.05	0.05	1.00	--	0.05
Níquel	mg/l	0.002	0.002	⁽³⁾	--	0.002
Cobre	mg/l	1.0	1.0	0.50	--	0.01
Plomo	mg/l	0.05	0.05	0.01	--	0.01
Zinc	mg/l	5.0	5.0	25.0	--	0.02
Cianuros (CN)	mg/l	0.02	0.2	⁽³⁾	--	0.005
Fenoles	mg/l	0.0005	0.001	⁽³⁾	--	0.001
Sulfuros	mg/l	0.001	0.002	⁽³⁾	--	0.002
Arsénico	mg/l	0.1	0.1	0.2	--	0.01
Nitratos (N)	mg/l	0.01	0.01	0.1	--	N.A
Pesticidas	mg/l	⁽⁶⁾	⁽⁶⁾	⁽⁶⁾	--	⁽⁶⁾
Niveles para parámetros y sustancias potencialmente dañinas						
M.E.H. ⁽⁷⁾	mg/l	1.5	1.5	0.5	0.2	--
S.A.A.M. ⁽⁸⁾	mg/l	0.5	0.05	1.0	0.5	--
C.A.E. ⁽⁹⁾	mg/l	1.5	1.5	5.0	5.0	--
C.C.E. ⁽¹⁰⁾	mg/l	0.3	0.3	1.0	1.0	--

Fuente: Ley general de Aguas-Perú DL N°17752,1969 (*) Usos de cursos de Agua.

- I. Aguas de abastecimiento doméstico con simple desinfección.
- II. Aguas de abastecimiento doméstico con tratamiento equivalente a procesos combinados de mezcla y coagulación, sedimentación, filtración y coloración aprobado por el Ministerio de Salud.
- III. Aguas para riegos de vegetales de consumo crudo y bebidas de animales.
- IV. Aguas de zonas recreativas de contacto primario (baño y similares).
- V. Aguas de zonas de pesca de mariscos bivalvos.

Notas:

- (1) Valores máximos en 50% de 5 o más muestras mensuales.
- (2) Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días a 20°).
- (3) Valores que determinan en caso que se sospeche presencia, aplique provisionalmente valores en la columna V.
- (4) Pruebas de 96 horas de LC50 por 0.02
- (5) Pruebas de 96 horas de LC50 multiplicada por 0.1, siendo LC50 la dosis que produce la muerte o inmovilización del 50% de las especies usadas para la bioprueba.
- (6) Para cada uso, los límites que se aplicarán son aquellos que han sido establecidos por el organismo estadounidense de protección ambiental (EPA).

- (7) Material extractable en hexano (principalmente grasa).
- (8) Sustancias activas de azul de metileno (detergente principalmente).
- (9) Extracto de columna de carbón activo por alcohol (según método de flujo lento).
- (10) Extracto de columna de carbón activo por cloroformo (según método de flujo lento) de (7) a (10) el Ministerio de Salud determina para cada caso la máxima T° para exposiciones cortas y en promedio semanal.

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

Problema N°1

A lo largo de un cauce natural, se ha tomado cuatro muestras de agua para analizar su aptitud para fines agrícolas. Se desea saber:

- a. La Relación de Adsorción de Sodio (RAS)
- b. La clasificación de las aguas con fines de riego según el diagrama del Salinity Laboratory.

Datos:

Ubicación	CE (μmhos/cm)	Cationes (mg/l)			Boro (ppm)	TDS (mg/l)
		Ca	Mg	Na		
Lugar A	655	83	25	7.6	0.11	331
Lugar B	14900	154	18	3340	--	9180
Lugar C	1140	62	20	148	0.17	627
Lugar D	340	53	12	5	0.40	189

Solución:

Lugar A

a) Relación de adsorción de sodio (RAS) de la muestra del lugar A

Haciendo la conversión de mg/ a meq/:

- Partes por millón en peso (ppm) de una sustancia en una solución cuando la densidad de ésta es la unidad, se cumple: **ppm = mg/l**
- Entre meq/ y ppm se cumple la siguiente relación:

$$\frac{ppm}{P.e.} = meq/l \quad \text{ó} \quad \frac{mg/l}{P.e.} = meq/l$$

Expresando los cationes en **meq/l** y los **P.e** en **mg**, se tiene:

$$Ca = \frac{83}{20} = 4.15 \text{ meq/l}$$

$$Mg = \frac{25}{12} = 2.08 \text{ meq/l}$$

$$Na = \frac{7.6}{2.3} = 0.33 \text{ meq/l}$$

El **RAS** se obtendrá con la siguiente relación:

$$RAS = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{++} + Mg^{++}}{2}}}$$

Dónde: Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++} están expresados en **meq/l**

- Reemplazando valores se obtiene:

$$RAS = \frac{0.33}{\sqrt{\frac{4.15 + 2.08}{2}}} = 0.187$$

b) Clasificación de las aguas para riego según el diagrama de Salinity Laboratory de la muestra del lugar A

Considerando la equivalencia:

- $\frac{mmhos}{cm} = 1,000 \frac{\mu mhos}{cm}$
- La CE de la muestra es 655 mhos/cm, haciendo uso de la equivalencia se expresa como 0.655 mmhos/cm.
- Si CE es **0.655 mmhos/cm** y el **RAS = 0.187**. Haciendo uso de la figura N°1 (clasificación de las aguas para riego) la muestra “A”

corresponderá a la clasificación:

$$C_2 - S_1: \text{Salinidad media y Sodicidad media}$$

Lugar B

a) Relación de adsorción de sodio (RAS) de la muestra del lugar B

Haciendo la conversión mg/l a meq/l :

- Partes por millón en peso (ppm) de una sustancia en una solución, cuando la densidad de ésta es la unidad se cumple:

$$\text{ppm} = \text{mg/l}$$

- Entre meq/l y ppm, se cumple la siguiente relación:

$$\frac{\text{ppm}}{\text{p. e.}} = \text{meq/l} \quad \text{o} \quad \frac{\text{mg/l}}{\text{p. e.}} = \text{meq/l}$$

- Expresando los **cationes en meq/l** y los **P.e. en mg** se tiene:

$$\text{Ca} = \frac{154}{20} = 7.70 \text{ meq/l}, \quad \text{Mg} = \frac{18}{12} = 1.50 \text{ meq/l} \quad \text{y} \quad \text{Na} = \frac{3,340}{23} = 145.22 \text{ meq/l}$$

El **RAS** se obtendrá con la siguiente relación:

$$\text{RAS} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\frac{\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}}{2}}}$$

Dónde: Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++} están expresados en meq/l .

- Reemplazando valores se tiene:

$$\text{RAS} = \frac{145.22}{\sqrt{\frac{1.50 + 7.70}{2}}} = 67.20$$

b) Clasificación de las aguas para riego según el diagrama de Salinity Laboratory de la muestra del lugar B

Considerando la equivalencia:

- $\frac{\text{mmhos}}{\text{cm}} = 1,000 \frac{\mu\text{mos}}{\text{cm}}$
- La CE de la muestra es **14,900 mhos/cm** haciendo uso de la equivalencia se expresa como **14.9 mmhos/cm**.
- Si CE es **14.9 mmhos/cm** y el RAS = **67.20**. Haciendo uso de la figura N°1 (clasificación de las aguas para el riego) la muestra “B” corresponderá a la clasificación:

$C_4 - S_4$: Muy alta salinidad y muy alta sodicidad

Lugar C:

a) Relación de adsorción de sodio (RAS) de la muestra del lugar C

- Haciendo La conversión de **mg/l** a **meq/l**, se tiene:
- Partes por millón en peso (ppm) de una sustancia en una solución, cuando la densidad de esta es la unidad, se cumple:

$$\text{ppm} = \text{mg/l}$$

- Entre **meq/l** y **ppm** se cumple con la siguiente relación:

$$\frac{\text{ppm}}{\text{P.e.}} = \text{meq/l} \quad \text{ó} \quad \frac{\text{mg/l}}{\text{P.e.}} = \text{meq/l}$$

P.e. se expresa en **mg**:

- Expresando los cationes en **meq/** y los **P.e.** en **mg**:

$$\text{Ca} = \frac{62}{20} = 3.10 \text{ meq/l} \quad , \quad \text{Mg} = \frac{20}{12} = 1.66 \text{ meq/l} \quad \text{y} \quad \text{Na} = \frac{148}{23} = 6.43 \text{ meq/l}$$

El **RAS** se obtendrá con la siguiente relación:

$$\text{RAS} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\frac{\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}}{2}}}$$

Dónde: Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++} están expresados en meq/

- Reemplazando valores se tiene:

$$\text{RAS} = \frac{6.43}{\sqrt{\frac{3.10 + 1.66}{2}}} = 4.17$$

b) Clasificación de las aguas para el riego según el diagrama del Salinity Laboratory de la muestra del lugar C

Considerando la equivalencia:

$$\bullet \quad \frac{\text{mmhos}}{\text{cm}} = 1,000 \frac{\mu\text{mos}}{\text{cm}}$$

- La CE de la muestra es 1,140 mhos/cm haciendo uso de la equivalencia se expresa como 1.14 mmhos/cm.
- Si CE es 1.14 mmhos/cm y el $\text{RAS} = 4.17$. Haciendo uso de la Figura N°1 (Clasificación de las aguas para riego) la muestra “C” corresponderá a la clasificación:

$\text{C}_3 - \text{S}_1$: Alta Salinidad y baja sodicidad

Lugar D:

a) Relación de adsorción de sodio (RAS) de la muestra del lugar D:

Haciendo la conversión de **mg/l** a **meq/l**:

- Partes por millón en peso (ppm) de una sustancia en una solución, cuando la densidad de esta unidad se cumple:

$$\text{ppm} = \text{mg/l}$$

- Entre meq/l y ppm se cumple la siguiente relación:

$$\frac{\text{ppm}}{\text{P.e.}} = \text{meq/l} \quad \text{ó} \quad \frac{\text{mg/l}}{\text{P.e.}} = \text{meq/l}$$

P.e. se expresa en **mg**:

- Expresando los cationes en **meq/l**:

$$\text{Ca} = \frac{53}{20} = 2.65 \text{ meq/l} \quad , \quad \text{Mg} = \frac{12}{12} = 1.00 \text{ meq/l} \quad \text{y} \quad \text{Na} = \frac{5}{23} = 0.22 \text{ meq/l}$$

El **RAS** se obtendrá con la siguiente relación:

$$\text{RAS} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\frac{\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}}{2}}}$$

Donde Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++} están expresados en **meq/l**

- Reemplazando valores, se tiene:

$$\text{RAS} = \frac{0.22}{\sqrt{\frac{2.65 + 1.00}{2}}} = 0.163$$

b) Clasificación de las aguas para riego según el diagrama de Salinity Laboratory de la muestra del lugar D:

Considerando la equivalencia:

$$\bullet \quad \frac{\text{mmhos}}{\text{cm}} = 1,000 \frac{\mu\text{mhos}}{\text{cm}}$$

- La CE de la muestra es **340 /cm** haciendo uso de la equivalencia se expresa como 0.34 mmhos/cm.
- Si CE es **0.34 mmhos/cm** y el **RAS = 0.163** haciendo uso de la figura N°1 (clasificación de las aguas para riego) la muestra “D” corresponderá a la clasificación:

$C_2 - S_1$: Salinidad media y sodicidad baja

Problema N°2

En la cuenca del río Vítor en Arequipa, se ha tomado muestras de agua en los puntos: Toma Socavón Puente Panamericana y Toma Huachipa, ubicados en las partes altas, media y baja, respectivamente de la cuenca. Los resultados físico-químicos son los siguientes:

Datos:

Muestras	pH	CE (dS/m)	Cationes (meq/l)					Aniones (meq/l)					Boro (ppm)	Oligoelementos (ppm)					
			Ca	Mg	Na	K	CO ₃	HCO ₃	NO ₃	SO ₄	Cl	Mn		Fe	Cu	Zn	Cd	Pb	
Toma (A) Socabón	7.14	1.96	7.07	2.45	8.42	0.26	0.0	3.49	0.30	4.95	10.0	1.7	0.05	0.53	0.04	0.03	0	0	
Pte. (M). Panamerica.	7.98	2.49	11.2	4.06	9.03	0.39	0.0	3.84	0.40	9.46	11.4	4.5	0.05	0.81	0.38	0.02	0	0	
Toma (B) Huachipa	6.67	3.36	15.09	4.98	11.78	0.49	0.0	3.95	0.50	10.45	18.5	3.9	0.07	0.65	0.21	0.02	0	0	

Cuenca alta (A). Cuenca media (M). Cuenca baja (B)

Se desea saber a través de la metodología de la FAO los grados de restricción que tienen estas muestras de agua con fines agrícolas.

Solución:

a) Cuenca alta-bocatoma Socavón

La metodología de la FAO considera varios problemas potenciales como es la salinidad, la infiltración, la toxicidad, oligoelementos, nitrógeno, bicarbonato y el pH. Los grados de restricción de uso que

pueden presentarse son: **Ninguna, Ligera o Moderado y Severa**. Haciendo uso del cuadro N°4 para interpretar la calidad de las aguas (FAO, 1987), se presentan los siguientes resultados:

Salinidad

La salinidad del agua es de 1.96 dS/m, el grado de restricción es de ligera a moderada. Esto significa que la presencia de sales en el agua reducirá su disponibilidad para los cultivos, a tal punto de afectar los rendimientos.

Infiltración

La Relación de adsorción de Sodio (RAS), según FAO (1987) estas aguas no tendrán efecto negativo sobre la velocidad de infiltración de los suelos, por lo que los cultivos recibirán suficiente agua entre riegos.

Toxicidad

La concentración de Sodio, Cloro y Boro en las aguas proveniente de la bocatoma Socavón son 8.42 meq/l, 10 meq/l, 1.70 meq/l; respectivamente. El grado de restricción de uso con fines de riego es ligera a moderada (riego por superficie y aspersión), pudiendo acumularse en los cultivos, en concentraciones suficientemente altas que pueden causar daños y reducir los rendimientos. Los límites permisibles de la concentración de Boro se aprecian en el Cuadro N°3.

Resultados de la calidad del agua en toma Socavón – Vitor – Cuenca Alta

Problema Potencial	Unidades	Grado de Restricción de uso		
		Ninguna	Ligera o Moderada	Severa
Salinidad (afecta disponibilidad de agua para cultivo) ²				
Eca 1.96	dS/m		X	
Infiltración (reduce infiltración); Evaluar usando a la vez: La Eca y el RAS ³				
RAS = 4.86 y Eca = 1.96		X		
Toxicidad de Iones Específicos (afecta cultivos sensibles)				
Sodio (Na) ⁴ = 8.42				
Riego por superficie	RAS		X	
Riego por aspersión	meq/l		X	
Cloro (Cl) ⁴ = 10.00				
Riego por superficie	meq/l		X	
Riego por aspersión	meq/l		X	
Boro (B) ⁵ = 1.70	mg/l		X	
Oligoelementos (cuadro 4)		X		
Varios (afecta cultivos sensibles)				
Nitrógeno (NO ₃ - N) ⁶ = 0.30	mg/l	X		
Bicarbonato (HCO ₃) = 3.49 (aspersión foliar únicamente)	meq/l		X	
pH = 7.14				Amplitud Normal : 6.5 – 8.4

Oligoelementos

Los oligoelementos analizados en las muestras de agua provenientes de las diferentes zonas del río Vitor son el manganeso (Mn), hierro (Fe), cobre (Cu), zinc (Zn), cadmio (Cd), y el plomo (Pb). Acorde a lo recomendado por FAO (1987), las concentraciones encontradas no causarán problemas.

Variación en el crecimiento de los cultivos (NO₃, HCO₃)

En el resultado de los análisis de las aguas, en cuanto a la presencia del nitrógeno (NO₃), es de 0.30. Esto indica que no existe restricción alguna. La presencia de bicarbonato (HCO₃) es de 3.49 siendo la

restricción de ligera a moderada. El efecto por aspersión es foliar, únicamente.

Efecto de la acidez o alcalinidad (pH)

El valor de pH del agua es de 7.14. Acorde a los límites antes mencionados, no se esperan efectos negativos.

b) Cuenca media – Puente Panamericana

La metodología de la FAO considera varios problemas potenciales como es la salinidad, la infiltración, la toxicidad, oligoelementos, nitrógeno, bicarbonato y el pH. Los grados de restricción de uso que pueden presentarse son: **Ninguno, Ligero a Moderado y Severo**. Haciendo uso del Cuadro N°4, para interpretar la calidad de las aguas (FAO, 1987) se presentan los siguientes resultados:

Salinidad

La salinidad del agua es de **2.49 dS/m**; el grado de restricción de uso varía de ligera a moderada. Esto significa que la presencia de sales en el agua reducirá su disponibilidad para los cultivos, a tal punto de afectar los rendimientos.

Infiltración

La Relación de Adsorción de Sodio (RAS), según FAO (1987), en estas aguas no tendrá efecto negativo sobre la velocidad de infiltración de los suelos, por lo que los cultivos recibirán suficiente agua entre riegos.

Toxicidad

La concentración de **sodio, cloro y boro es 9.03 meq/l, 11.40 meq/l y 4.50 meq/l**, respectivamente. El grado de toxicidad de sodio con fines de riego por superficie y aspersión es ligera a moderada y es severo debido a la concentración de Cloro para el riego de superficie, pero es ligera a moderada para el riego por aspersión. La toxicidad por Boro es Severa. Los cultivos resistentes a concentración de Boro se aprecian en el cuadro N°6.

concentraciones encontradas no causarán problemas, salvo por el cobre (Cu), **cuyas concentraciones de 0.38 mg/l** sobrepasa los límites permisibles, es decir será tóxico para ciertas plantas en soluciones nutritivas.

Variación en el crecimiento de los cultivos (NO_3 , HCO_3)

Los análisis de las aguas arrojan una cantidad de nitrógeno (NO_3) de 0.40 lo cual indica que no existe restricción alguna. La presencia de bicarbonato (HCO_3) es de 3.84, la restricción es de ligera a moderada, en consecuencia el afecto por aspersión es foliar únicamente.

Efecto de la acidez o alcalinidad (pH)

El valor del **pH es de 7.98**, acorde a los límites antes mencionados, no se esperan efectos negativos.

c) Cuenca baja – Toma Huachipa

Según la metodología de la FAO utilizada, considera varios problemas potenciales como es la salinidad, la infiltración, la toxicidad, oligoelementos, nitrógeno, bicarbonato y el pH. Los grados de restricción de uso que pueden presentarse son: *Ninguna, Ligera a Moderada y Severo*. Haciendo uso del cuadro N°4 para interpretar la calidad de las aguas (FAO, 1987), se presentan los siguientes resultados:

Salinidad

La salinidad es **3.36 dS/m**, por lo que su uso es limitativo para el riego, dado que el valor permisible es **3.0 dS/m**. Este efecto ha comenzado a tener incidencia sobre los suelos y los rendimientos de los cultivos agrícolas en esta zona.

Infiltración

La **relación de adsorción de sodio** ajustada es 5.07. Según FAO (1987), estas aguas no tendrán efecto negativo sobre la velocidad de infiltración de los suelos.

Toxicidad

La concentración de **sodio, cloro y boro** es **11.78 meq/l, 18.50 meq/l, 3.90 meq/l, respectivamente**. El grado de toxicidad del sodio con fines de riego por superficie y aspersión es ligera a moderada, y es severo debido a la concentración de cloro para el riego por superficie, pero es de ligera moderada para el riego por aspersión. La toxicidad por boro es severa. Los cultivos resistentes al boro se aprecian en el Cuadro N°6.

Oligoelementos

Los oligoelementos analizados en las muestras de agua son el manganeso (Mn), hierro (Fe), cobre (Cu), Zinc (Zn), Cadmio (Cd), y el plomo (Pb). Acorde a lo recomendado por FAO (1987), las concentraciones encontradas no causarán problemas, salvo el cobre (Cu) cuyas concentraciones varían de 0.38 mg/l que sobrepasa los límites permisibles, en consecuencia será tóxico para ciertas plantas en soluciones nutritivas.

Variación en el crecimiento de los cultivos (NO_3 , HCO_3)

Los análisis de las aguas arrojan una cantidad de nitrógeno (NO_3) de 0.50 lo cual indica que no existe restricción alguna. La presencia de bicarbonato (HCO_3) es de 3.95. La restricción es de ligera a moderada, el efecto por aspersión es foliar únicamente.

Efecto de la acidez o alcalinidad (pH)

Los valores de pH de las aguas son de 6.67 acorde a los límites antes mencionados. No se esperan efectos negativos.

Resultados de calidad de agua en toma Huachipa - Victor - Cuenca Baja

Problema Potencial	Unidades	Grado de Restricción de uso		
		Ninguna	Ligera o Moderada	Severa
Salinidad (afecta disponibilidad de agua para cultivo) ²				
Eca 3.36	dS/m			X
Infiltración (reduce infiltración); Evaluar usando a la vez: La Eca y el RAS ³				
RAS = 5.07 y Eca = 3.36		X		
Toxicidad de Iones Específicos (afecta cultivos sensibles)				
Sodio (Na) ⁴ = 11.78				
superficie Riego por	RAS		X	
aspersión Riego por	meq/l		X	
Cloro (Cl) ⁴ = 18.50				
superficie Riego por	meq/l			X
aspersión Riego por	meq/l		X	
Boro (B) ⁵ = 3.90	mg/l			X
Oligoelementos (cuadro 4)		X		
Varios (afecta cultivos sensibles)				
Nitrógeno (NO ₃ - N) ⁶ = 0.50	mg/l	X		
Bicarbonato (HCO ₃) = 3.95 (aspersión foliar únicamente)	meq/l		X	
pH = 6.67		Amplitud Normal : 6.5 – 8.4		

CAPÍTULO VII

DISEÑO DE UN SISTEMA DE RIEGO POR GRAVEDAD

Un sistema de riego es eficiente en la medida que compatibiliza adecuadamente los factores de topografía, suelo y cultivo a fin de lograr una aplicación uniforme del agua de riego y con una buena eficiencia según el sistema utilizado. Es decir, restituir la humedad a la zona de raíces con el mínimo de pérdidas de agua por percolación profunda o por escurrimiento superficial así como mínima erosión del suelo, mínimo costo y una mínima o nula inconveniencia para el desarrollo de las otras labores culturales.

En forma resumida, se pueden mencionar los siguientes objetivos que deben lograrse con un buen diseño del sistema de riego:

- Restituir la humedad de la zona radicular del cultivo.
- Mantener un balance adecuado de sales en la zona de raíces.
- Distribución uniforme del perfil humedecido.
- Mínimo movimiento de tierras.
- Mínimo escurrimiento superficial fuera del campo.
- Mínimo porcentaje de área dedicada al sistema de distribución del agua (4 – 5%: normal) y a caminos (4 – 5%: normal).
- Compatibilización del sistema de riego con el uso de la maquinaria agrícola en las diversas labores agronómicas, siempre y cuando se use maquinaria.
- El trabajo requerido para el riego debe minimizarse, y
- Adaptación del sistema de riego al tipo de suelo, topografía, tamaño y forma de los campos.

7.1 Descripción del riego por gravedad

Un sistema de riego puede describirse así:

- En el riego por gravedad, se consigue que el agua aplicada fluya mediante la gravedad, debido a la pendiente del suelo y a la carga de agua.
- El agua ingresa al campo por la parte más alta y luego sigue la pendiente del Suelo.
- Del agua que ingresa al surco o melga, parte se infiltra y el resto sigue avanzando hasta la parte final.
- El tirante o caudal de agua sobre el suelo va disminuyendo gradualmente a medida que avanza el agua sobre el surco o melga.
- Una vez que el agua llega al extremo inferior del campo, el tirante de agua a lo largo del recorrido puede ser casi uniforme.
- Una vez suspendido el ingreso de agua, aún sigue fluyendo a lo largo de los surcos o melgas por un cierto tiempo más: recesión o merma.
- Desde que el agua ingresa al surco o melga hasta que llega a su extremo final, transcurre un tiempo: tiempo de avance. La cabecera del campo tiene una mayor lámina infiltrada respecto a la parte final de los surcos o melgas, ya que el tiempo de infiltración es mayor. Esta diferencia puede disminuir después de que se suspenda el riego, ya que la tasa de infiltración será mayor al pie del surco o melga que en la cabecera; y, además, el agua tarda más en desaparecer en el extremo final que en la cabecera.

En el riego superficial por gravedad, el agua puede aplicarse ya sea por surcos, melgas o por pozas. Se usa el riego por surco, cuando se trata de cultivos sembrados en línea (maíz, espárragos, algodón, caña de azúcar, papa, etc.); mientras que las melgas se utilizan cuando se trata de cultivos que cubren el terreno de un modo continuo (arroz, alfalfa, etc.). Las pozas normalmente se utilizan en los cultivos de frutales u otras especies arbóreas.

7.2 Diseño del riego por melgas

Este tipo de riego se da cuando el terreno se divide en fajas o melgas por medio de bordos, a fin de lograr que cada faja se riegue independientemente. Las

melgas deben de tener pendiente transversal cero y pendiente longitudinal mínima (<1.0 o/oo). El uso de melgas es apropiado en terrenos que tienen pendientes hasta de $3 - 4$ o/oo (3 a 4 por mil).

Este método es apropiado para cultivos que cubren totalmente el suelo (pastos y cereales menores principalmente). Se adapta mejor en aquellos suelos de textura franca a ligeramente pesada; es decir, de moderada a ligeramente baja tasa de velocidad de infiltración básica, menor de 3 cm/hora, aproximadamente. En cambio, no es muy recomendable su uso en suelos de textura ligera (arena) ni extremadamente pesada, por la muy alta o extremadamente baja tasa de velocidad de infiltración, respectivamente.

En el riego por melgas, se puede lograr una buena eficiencia si se diseñan; y construyen adecuadamente los bordes y regaderas. El ancho de las melgas debe permitir una adecuada operación de la maquinaria agrícola a emplear en las diferentes labores agronómicas.

Cuando se tiene una pendiente transversal, no se debe permitir un desnivel entre bordes mayor de 7.5 cm aproximadamente, a fin de evitar una mayor concentración de agua en el borde más bajo. La altura de los bordes debe ser de unos $15 - 20$ cm aproximadamente. Se debe considerar como una desventaja del riego por melgas el hecho que exige que el terreno debe ser relativamente plano.

Para diseñar un sistema de riego por melgas, se requiere definir la siguiente Información:

- Plano altimétrico y perímetro del terreno. El plano altimétrico debe estar con curvas a nivel equidistantes de 0.1 m.
- Ubicación y cotas de los puntos de captación, entrada y salida de agua.
- Cultivos que se van a establecer.
- Plano textural del suelo hasta una profundidad de $30 - 60$ cm, o más si se considera necesario. Dependiendo del tipo de cultivo.
- Ancho de los implementos mecánicos utilizados en las diferentes labores agrícolas (m).
- Lámina neta crítica de riego (cm).
- Eficiencia de riego representativa (%).

- Funciones de avance, infiltración y recesión o merma.
- Características del reparto de agua en la zona, turnos; épocas críticas de baja disponibilidad, etc.
- Características propias de los agricultores de la zona.

Con el diseño se busca resolver las siguientes interrogantes:

1. División del campo en melgas o unidades de riego.
2. Dirección y pendiente (o/oo) del trazo de las melgas.
3. Ancho de las melgas (m).
4. Números de melgas.
5. Lámina crítica de riego (cm).
6. Longitud de las melgas (m).
7. Caudal de riego a aplicar en cada melga (l/s).
8. Tiempo de riego por tendida (horas).
9. Tiempo necesario para regar todo el campo (días u horas).

Ejemplo de un diseño de un sistema de riego por melgas

Se tiene un campo de 300 m de ancho por 400 m de largo (12 Ha) y una pendiente longitudinal promedio de 1.1 %. La pendiente transversal es de 9.4%. Además de las pruebas de campo, se obtuvo la siguiente información:

- a. Curva de retención o curva pF.
- b. Características de infiltración.
- c. Características físicas del suelo.
- d. Criterio de riego: cuando la tensión de humedad en el suelo alcance 2 bares.
- e. El Cultivo a sembrar: alfalfa; profundidad de raíces 0.90 m; ancho de la segadora es de 3.00 m.
- f. Pérdida por percolación profunda: como máximo de 5% del agua infiltrada.
- g. La prueba de avance arrojó los siguientes datos:

Prueba de avance

Metros desde el origen (m)	Tiempo de avance (min)
0	0
50	4
100	10
150	18
200	28
250	38
300	50

Además, de pruebas de campo se obtuvo:

Profundidad	Densidad aparente (g/cm ³)	Textura
0 – 50	1.42	Franca
50 – 90	1.50	Franco – Arenosa

Curva de retención

Tensión (bares)	Contenido de humedad (masa%)	
	Prof. 0 – 50 (cm)	Prof. 50 – 90 (cm)
0.1	30.0	24.0
0.2	25.0	18.0
0.3	22.0	15.0
0.5	18.0	13.0
0.8	16.0	12.2
1.0	14.5	11.5
2.0	13.5	9.1
3.0	12.0	8.0
5.0	11.0	6.9
10.0	10.4	6.3
15.0	10.0	6.0

Prueba de infiltración

Tiempo acumulado (min)	Lámina infiltrada acumulada (cm)
1	0.7
5	1.3
10	2.6
15	4.5
20	5.7
30	6.5
45	7.6
60	8.2
90	8.9
120	9.6
150	9.8
200	10.1

Se pide determinar:

1. El tiempo de riego recomendado.
2. El ancho, el largo de cada melga y el número de melgas que se tendrá.
3. El caudal de riego recomendado, y
4. Cuantos m³/ha se aplicará en el riego y la eficiencia de aplicación que se podrá alcanzar.

Solución:

Cálculo de la lámina neta de riego

Según el criterio de riego dado, se aplica el riego cuando la humedad en el suelo alcanza una tensión de 2 bares; y se tiene que aplicar una cantidad suficiente de agua con tal de llevar la humedad del suelo su capacidad de campo (0.3 bares).

$$La = \left[\frac{\theta_{mcc} - \theta_{mpmp}}{100} \right] * \frac{D_{ap} * Prof}{\rho_w}$$

Aplicando esta ecuación tenemos:

Capa 0 – 50 cm:

$$La_1 = \left[\frac{22.0 - 13.5}{100} \right] * \frac{1.42 \frac{g}{cm^3} * 50 \text{ cm}}{1 \frac{g}{cm^3}}$$

$$La_1 = 6.035 \text{ cm}$$

Capa 50 – 90 cm:

$$La_2 = \left[\frac{15.0 - 9.1}{100} \right] * \frac{1.5 \frac{g}{cm^3} * 40 \text{ cm}}{1 \frac{g}{cm^3}}$$

$$La_2 = 3.540 \text{ cm}$$

Luego, la lámina de agua a restituir será de $6.035 + 3.540 = 9.575 \text{ cm}$.

Rpta: **La lámina de agua a restituir será = 9.575 cm**

En los siguientes procedimientos, se van a calcular los valores de los parámetros A y B que pertenecen a la función de la lámina infiltrada acumulada ($I_{cum} = ATo^B$), por lo que procedemos a calcular dichos parámetros:

Tiempo de oportunidad acumulado (min) (To)	Lámina infiltrada acumulada (cm) (I _{cum})	log To = X	log (I _{cum}) = Y	X*Y	X ²	Y ²
1	0.7					
5	1.3	0.699	0.114	0.080	0.489	0.013
10	2.6	1.000	0.415	0.415	1.000	0.172
15	4.5	1.176	0.653	0.768	1.383	0.427
20	5.7	1.301	0.756	0.983	1.693	0.571
30	6.5	1.477	0.813	1.201	2.182	0.661
45	7.6	1.653	0.881	1.456	2.733	0.776
60	8.2	1.778	0.914	1.625	3.162	0.835
90	8.9	1.954	0.949	1.855	3.819	0.901
120	9.6	2.079	0.982	2.042	4.323	0.965
150	9.8	2.176	0.991	2.157	4.735	0.983
200	10.1	2.301	1.004	2.311	5.295	1.009
Suma		17.59512129	8.47275356	14.8937	30.8134	7.31232

Calculando el valor de B:

$$B = \frac{n(\sum X_i Y_i) - \sum X_i \sum Y_i}{n \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2}$$

$$B = \frac{11 * (14,8937) - (17,5951)(8,4728)}{11 * (30,8134) - (17,5951)^2} \Rightarrow \boxed{B = 0.502}$$

Calculando el valor de A:

$$A_0 = \frac{\sum Y_i}{n} - \frac{B \sum X_i}{n}$$

$$A_0 = \frac{8.4728}{11} - \frac{(0.502) * (17.5951)}{11} \Rightarrow \boxed{A_0 = -0.0335}$$

Donde: **A = anti log (A₀)**

Finalmente calculando A:

$$A = \text{anti log}(-0.0335) \Rightarrow A = 0.9258$$

La función de la lámina infiltrada acumulada se expresará de la siguiente forma:

$$I_{\text{cum}} = 0.9258 * T_o^{0.502}$$

Como el porcentaje de pérdida por percolación profunda como máximo debe ser de 5% del agua infiltrada y aplicando la relación:

$$P = \frac{(R + 1)^B - R^B}{(R + 1)^B + R^B} * 100$$

$$R = \frac{t_o}{t_a}$$

Donde:

P = Percolación profunda (%)

B = Exponente de la ecuación de la infiltración acumulada

Lo ideal es que el valor de R tenga un valor lo más cercano a 4.00, pero para valores menores de 4.53, la percolación profunda supera valores más elevados al valor de 5%.

$$P = 5\% \quad y \quad R = 4.53$$

Como se conoce que: $I_{\text{cum}} = 0.9625 t_o^{0.5020}$

Reemplazando el valor de la lámina de riego 9.575 cm; luego se tendrá que:

$$t_o = 109.17 \text{ min}$$

Por lo tanto t_a , se obtendrá:

$$R = 4.53 = \frac{109.16}{t_a}, \text{ de donde } t_a = 24.10 \text{ min}$$

Finalmente, el tiempo de riego quedará definido:

$$t_r = t_o + t_a = 109.16 + 24.10$$

Rpta. $t_r = 133.3 \text{ min}$

Cálculo del largo y ancho de la melga:

Con los datos de la prueba de avance, se determina su ecuación respectiva:

$$X = 19.18 t_a^{0.7060}, \text{ y con el dato de } t_a = 24.10 \text{ min}$$

Se determina en la ecuación anterior que: $X = 181 \text{ m}$

Como el largo del campo es de 400 m; y si la longitud de cada melga es 181 m saldría un número fraccionado de las melgas; ante esto se redondea a una longitud de:

$$X = 200 \text{ m}$$

El ancho de cada melga se calcula asumiendo un desnivel entre bordes de 4 cm y conociendo la pendiente transversal (0.4%):

$$\text{Ancho} = \frac{\text{tolerancia}}{\text{pendiente transversal}} = \frac{4}{0.4} = 10.0 \text{ m}$$

Como la segadora tiene un ancho de 3 m y el cultivo a instalar es pasto; luego el ancho calculado se reajusta a un múltiplo del ancho de la maquinaria a usar:

$$\text{Ancho} = 9 \text{ m}$$

A este ancho, se suma 1.00 m que corresponde a la base de cada borde (sobre todo para cultivos de corte). Dando, por lo tanto, un ancho total de 11.0 m. Luego, el número total de melgas será:

$$N^{\circ} \text{ de Melgas} = \frac{\text{Ancho del campo} - \text{Ancho base del borde}}{\text{Ancho de melga} + \text{Ancho base del borde}}$$

$$N^{\circ} \text{ de Melgas} = \frac{300-1}{9.0+1} = 29.9$$

Luego, redondeando se podrá tener 30 melgas; y como se tienen 2 bloques, el número total de melgas sería:

$$N^{\circ} \text{ de Melgas} = 30 (2) = 60$$

Cálculo del caudal de riego:

El caudal máximo no erosivo se calcula mediante la relación:

$$Q_{\text{máx}} = 0.06 * S^{0.75} \text{ (pies}^3/\text{s)}$$

Como la pendiente longitudinal es muy alta (1.1%), se debe bajar dicha pendiente hasta 0.5 % aproximadamente mediante un movimiento de tierras.

Luego:

$$Q_{\text{máx}} = 0.06 (0.5)^{0.75} = 0.03567 \text{ ft}^3/\text{s} \text{ por pie de ancho. Luego, para el ancho de 9 m y uniformizando unidades se tendrá:}$$

$$Q_{\text{máx}} = (0.03567) (28.316) (3.3) (9)$$

$$Q_{\text{máx}} = 30 \text{ l/s/ melga}$$

Este caudal corresponde a un suelo descubierto. Para un suelo con vegetación, donde la resistencia hidráulica se incrementa, este caudal puede ser incrementado hasta en un 50%; es decir el $Q_{\text{máx}}$ puede ser hasta de 45 l/s/melga. Este caudal se utiliza durante el avance; luego, se reduce en función de la velocidad de infiltración que tiene el suelo entre el fin del avance y la finalización del riego.

Luego:

$$i = \frac{i_{ta} + i_{tf}}{2} = 4.50 \text{ cm/hora}$$

i_{ta} = velocidad de infiltración para $t_o = t_a$

i_{tf} = velocidad de infiltración para $t_o = t_f$

Calculando el caudal en cada melga:

$$Q = i * (Largo) * (Ancho)$$

$$Q = \left(4.5 \frac{cm}{hr}\right) * (200 m) * (9 m)$$

Uniformizando unidades:

$$Q = \left[4.5 \frac{cm}{hr} * \left(\frac{1 hr}{3600 s}\right) \left(\frac{1 m}{100 cm}\right)\right] * (200 m) * (9 m) * \left(\frac{1,000 litros}{1 m^3}\right)$$

$$\therefore Q = 22.5 \text{ l/s/melga}$$

Este caudal será usado durante la segunda etapa del riego.

Se recomienda determinar el caudal máximo no erosivo mediante pruebas de campo, ya que las fórmulas sólo constituyen valores referenciales.

Cálculo de la eficiencia de aplicación (E_{ap}) y m^3/Ha

$$Volumen_{requerido / melga} = 172.44 m^3$$

$$Volumen_{aplicado} = Volumen_{avance} + Volumen_{seg. etapa}$$

$$Volumen_{aplicado} = (30 \text{ l/s}) (24.10 \text{ min}) + (22.5 \text{ l/s}) (109.16 \text{ min})$$

Uniformizando unidades, se tiene:

$$Volumen_{aplicado} = 190.75 m^3$$

$$\text{Luego: } E_{ap} = \frac{172.44}{190.75} = 90\%$$

El volumen de agua aplicado por hectárea será:

$$Volumen \text{ aplicado de agua por melga} = 190.75 m^3$$

Como cada melga tiene 1,800 m² de área neta luego:

Rpta: $V_{\text{aplicado}} / \text{Ha} = 1,060 \text{ m}^3/\text{Ha}$

7.3 Diseño del riego por surcos

Para el diseño de un sistema de riego por surcos, se requiere de la misma información que en el caso de melgas. En cuanto a las interrogantes que se busca resolver con el diseño tenemos las siguientes:

1. División del campo en unidades de riego o cuarteles.
2. Dirección y pendiente (o/oo) de los surcos.
3. Esparcimiento entre surcos (m).
4. Largo de los surcos (m).
5. Caudal de riego a usarse en el avance y en la segunda etapa del riego (l/s).
6. Tiempo de riego por tendida (horas).
7. Tiempo total de riego para cubrir todo el campo (días).

Ejemplo de un diseño de un sistema de riego por surcos

Diseñar un sistema de riego por surcos para un terreno que tiene las siguientes características:

- Largo : 500 m
- Ancho : 300 m
- Pendiente transversal : 3.0 o/oo
- Pendiente longitudinal : 4.0 o/oo
- Caudal crítico disponible : 20 /s en forma continua
- Fecha de siembra : Enero
- Eficiencia de conducción : 60 %
- Cultivo a sembrar : maíz grano
- Espaciamento entre surcos : 0.90 m
- Lámina neta de riego a ser aplicada : 5 cm
- Distancia de la fuente de agua a la cabecera de la parcela : 2 Km

En pruebas de campo se halló

$$\begin{array}{lll} X & = 31.5 t_a^{0.500} & \dots\dots\dots \text{F. de Avance} \\ I & = 0.560 t_o^{0.520} & \dots\dots\dots \text{F. de Infiltración acumulada} \\ X & = 40.5 t_m^{0.520} & \dots\dots\dots \text{F. de Merma o recesión} \end{array}$$

Las unidades para cada una de las variables se tienen en:

$$X = \text{m}, \quad t_o = \text{min}, \quad t_a = \text{min}, \quad I = \text{cm}, \quad t_m = \text{min}$$

Los valores de Evapotranspiración potencial (ETP) y del factor de cultivo (K_c) varían:

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun
ETP (mm/día)	140.80	152.20	159.80	130.20	112.40	98.20
K_c	0.78	0.88	1.10	1.12	0.90	0.70

Se pide determinar:

- La longitud óptima de los surcos.
- El tiempo de riego recomendado por posición.
- La frecuencia crítica de riego recomendada.
- La eficiencia de aplicación alcanzada.
- La eficiencia de riego que se logra.
- Caudal de riego a usarse en el avance y 2^{da}, etapa del riego.
- El tiempo necesario para regar toda la parcela, si el riego es día y noche continuo.

Solución:

a) Cálculo de la longitud óptima de surco

Si la lámina neta de agua a ser aplicada en el riego, es de 5 cm. El tiempo de oportunidad será:

$$t_o = \left(\frac{5.0}{0.560} \right)^{1/0.520} = 67.36 \text{ min}$$

Para un diseño de máxima eficiencia, se tiene:

$$t_a = \frac{t_o}{4} \rightarrow t_a = \frac{67.36}{4} = 16.84 \text{ min}$$

Con este valor de t_a , se entra a la función de avance y se halla el valor de la longitud correspondiente:

$$X = 31.5 (16.84)^{0.500}$$

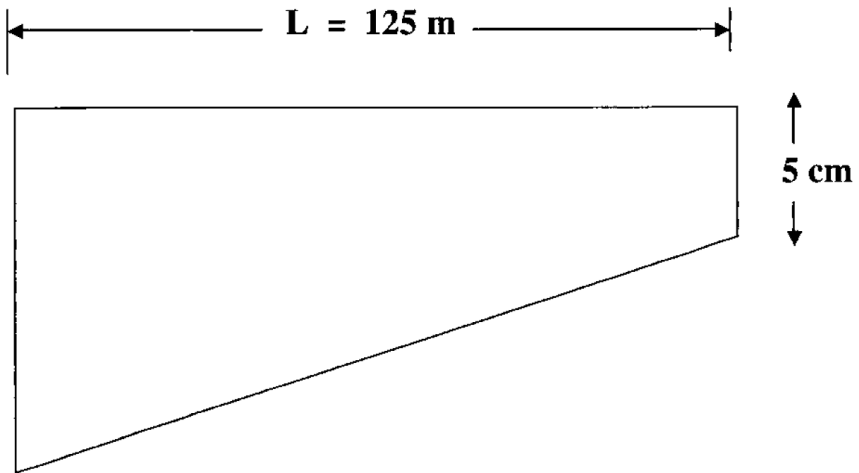
$$\boxed{X = 129.26 \text{ m}}$$

Luego, si la longitud de todo el campo es de 500 m, entonces la longitud más recomendable para el surco se redondeará hacia abajo, quedando:

Rpta:

$$\boxed{X = 125 \text{ m}}$$

b) Cálculo del tiempo de riego recomendado



$$\therefore t_r = 74.36 \text{ min}$$

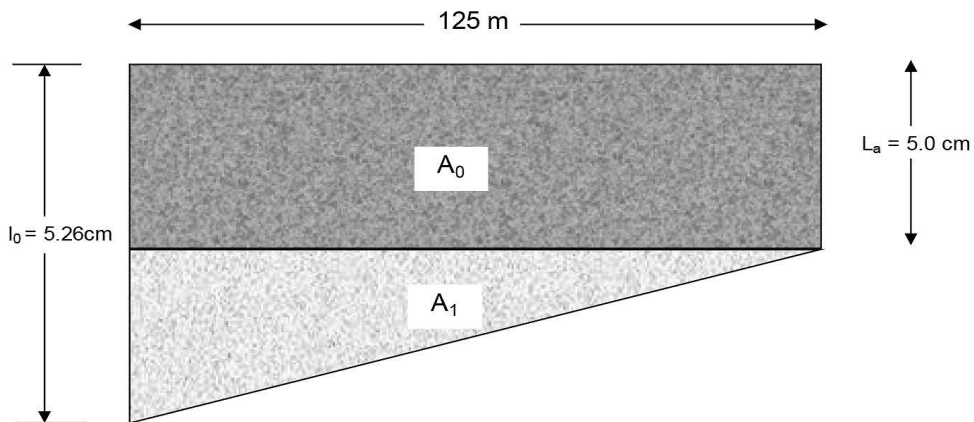
Rpta: Redondeando, se recomendaría un tiempo de riego de 75 min.

c) Cálculo de la frecuencia crítica de riego

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun
ETP (mm/mes)	140.8	152.2	159.8	130.2	112.4	98.2
K_c	0.78	0.88	1.10	1.12	0.90	0.70
ETA (mm/mes)	109.8	133.9	175.8	145.8	101.2	68.7
L neta de riego (mm)	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0
Fr (días)	14	10	8	10	14	21

Rpta: De donde, la frecuencia crítica de riego (Fr) será de 8 días.

d) Cálculo de la eficiencia de aplicación alcanzada



$$I_o = 0.560 * t_o^{0.520} = 0.560 (74.36)^{0.520}$$

$$I_o = 5.26 \text{ cm}$$

$$A_0 = 123 \left(\frac{5}{100} \right) = 6.25$$

$$A_1 = \frac{125 \left(\frac{0.26}{100} \right)}{2} = 0.1525$$

$$E_{ap} = \frac{A_0}{A_0 + A_1} = \frac{6.2500}{6.4125}$$

$$E_{ap} = 0.9746$$

Rpta: $E_{ap} = 97.46\%$

e) Cálculo de la eficiencia de riego (E_r)

$$E_r = E_c * E_{ap}$$

$$E_r = (0.60) (0.97) = 0.582$$

Rpta: $E_r = 58.2\%$

f) Cálculo del caudal de riego

Para el avance: $Q_{m\acute{a}x} = \frac{38}{s}$

Suponiendo una pendiente del surco de 0.3 %, luego:

$$Q_{m\acute{a}x} = \frac{38}{0.3} = 126.7 \text{ l/min}$$

Rpta: $Q_{m\acute{a}x} = 2.11 \text{ l/s}$

Rpta: $Q_{m\acute{a}x} = 2.11 \text{ l/s}$

Significando que el caudal máximo no erosivo estimado sería de 2.11 l/s/surco; pero, es conveniente determinar este caudal en forma práctica en el campo. Luego, el valor calculado (2.11 l/s) debe ser utilizado como referencial solamente.

Para la segunda etapa del riego:

A partir de la función de la lámina infiltrada acumulada, se halla la función de la velocidad de infiltración instantánea:

$$i = 17.472 t_o^{-0.48} (i: \text{cm/hora}; t_o: \text{min})$$

Luego, se puede calcular la tasa de la velocidad de infiltración para:

$$t_a = 15.74 \text{ min} \quad i = 4.653 \text{ cm/hora}$$

Conociendo el largo del surco, el espaciamiento entre surcos y el valor de i , se calcula:

$$Q = (i) * (L) * (a)$$

$$Q = (4.653 \text{ cm/hora}) * (12,500 \text{ cm}) * (90 \text{ cm})$$

$$Q = 5,235 \text{ litros/hora} = 1.45 \text{ l/s}$$

Rpta: **Q = 1.45 l/s**

g) Cálculo de la duración del riego de toda la parcela

$$\text{Lámina neta} = 5 \text{ cm}$$

$$\text{Eficiencia de riego} = 0.582$$

$$\text{Lámina bruta} = 8.591 \text{ cm} \rightarrow \text{Volumen bruto} = 859.1 \text{ m}^3/\text{Ha}$$

$$\text{Volumen necesario total} = (859.1)(15) = 12886.5 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen disponible por hora} = 20 \text{ l/s} * 3,600 \text{ s/hora} = 72 \text{ m}^3/\text{Hora}$$

$$\text{Nº horas} = \frac{12886.5 \text{ m}^3}{72 \text{ m}^3/\text{hora}} = 178.98 \text{ horas}$$

$$\text{Nº días} = 178.98 \text{ horas} * \left(\frac{1 \text{ día}}{24 \text{ horas}} \right) = 7.46 \text{ días}$$

Rpta: **Nº días = 7.46 días**

Lo que significará que toda la parcela se podrá regar en las condiciones más desfavorables en 7.46 días (7 días y 11 horas), lo cual es menor que la frecuencia crítica de riego; dicha situación, resulta favorable.

7.4 Evaluación de un sistema de riego por gravedad

Para evaluar el grado de eficiencia con la que funciona un sistema de riego por gravedad, se desarrolla el siguiente ejemplo:

En un campo con cultivo de caña de azúcar, cuya profundidad de raíces es de 90 cm, se obtuvo la siguiente información de las pruebas de campo que se desarrollaron:

a) Profundidad (cm)	Densidad aparente (g/cm ³)	Textura
0 – 50	1.42	Franca
50 – 90	1.50	Franco – Arenosa

b) Curva de retención

Tensión (bares)	Contenido de humedad (masa%)	
	Prof. 0 – 50 (cm)	Prof. 50 – 90 (cm)
0.1	30.0	24.0
0.2	25.0	18.0
0.3	22.0	15.0
0.5	18.0	13.0
0.8	16.0	12.2
1.0	14.5	11.5
2.0	13.5	9.1
3.0	12.0	8.0
5.0	11.0	6.9
10.0	10.4	6.3
15.0	10.0	6.0

c) Infiltración

Tiempo acumulado (min)	Lámina infiltrada acumulada (cm)
1	0.7
5	2.0
10	3.2
15	4.8
20	5.7
30	6.8
45	7.6
60	8.2
90	8.9
120	9.6
150	9.8
200	10.1

d) Avance y recesión

Longitud desde Origen(m)	Tiempo de Avance (min)	Tiempo de Merma o Recesión (min)
0	0	0
20	2	1
40	5	3
60	9	4
80	14	6
100	20	7
120	27	9
140	35	12
160	42	13

e) Las raíces tiene una distribución según la profundidad:

Profundidad (cm)	Porcentaje (%)
0 – 50	70
50 – 90	30

f) Largo de surco: 150 m; espaciamiento entre surcos: 1.50 m.

g) El consumo de agua promedio real del cultivo es 5.00 mm/día.

- h) El tiempo de riego es de 6 horas por tendida.
- i) Los riegos se aplican en la zona cada 20 días.

Se pide determinar:

- a) ¿Qué opina del riego que se aplica en la zona (eficiencias y estado energético)?
- b) ¿Qué tiempo de riego recomendaría aplicar y cuántos m³/ Ha?

Solución:

Cálculo de la función de la lámina infiltrada acumulada:

$$I_{cum} = A T_o^B$$

Aplicando el método de los mínimos cuadrados:

$$B = \frac{12(15.797) - (8.633784)(17.595121)}{12(30.813420) - (17.595141)^2} = 0.5020$$

$$A_o = \frac{\sum Y_i}{n} - \frac{B \sum X_i}{n}$$

$$A_o = \frac{8.633784}{12} - \frac{0.5020(17.595121)}{12} \Rightarrow A_o = -0.01658$$

Luego: $A = \text{antilog}(A_o) = \text{antilog}(0.01658) \Rightarrow A = 0.9625$

El coeficiente de determinación resulta: $r^2 = 0.9328$

Luego, la ecuación será: $I = 0.9625 t_o^{0.5020}$

El consumo de agua entre riegos es de: (5 mm/día)(20 días) = 100 mm

Según la distribución de raíces; el consumo de agua será:

$$\text{Capa } 0 - 50 \text{ cm} : (100 \text{ mm})(70 \%) \Rightarrow 100 \text{ mm}(0.7) = 70 \text{ mm} = 7.0 \text{ cm}$$

$$\text{Capa } 50 - 90 \text{ cm} : (100 \text{ mm})(30 \%) \Rightarrow 100 \text{ mm}(0.3) = 30 \text{ mm} = 3.0 \text{ cm}$$

De acuerdo a la curva de retención podemos ver que la capacidad de campo se logra a una tensión de 0.3 bars.

$$\text{Prof } 0 - 50: \quad \theta_m = 22\%$$

$$\text{Prof } 50 - 90: \quad \theta_m = 15\%$$

La lámina de agua a capacidad de campo será:

$$La = \frac{\theta_m * D_{ap} * \text{prof}}{100}$$

$$\text{Capa } 0 - 50 \text{ cm: } \frac{22(1.42)(50)}{100} = 15.62 \text{ cm}$$

$$\text{Capa } 50 - 90 \text{ cm: } \frac{15(1.50)(40)}{100} = 9.00 \text{ cm}$$

Luego el contenido de humedad antes del riego será:

$$\text{Capa } 0 - 50 \text{ cm} = 15.62 - 7.0 = 8.62 \text{ cm} \Rightarrow 12.14 \text{ masa}\%$$

$$\text{Capa } 50 - 90 \text{ cm} = 9.0 - 3.0 = 6.00 \text{ cm} \Rightarrow 10.00 \text{ masa}\%$$

Sobre la base de los contenidos de humedad anterior y los datos de la curva de retención, se tiene:

$$\text{Capa } 0 - 50 \text{ cm: } 12.14 \text{ masa}\% \Rightarrow 2.93 \text{ bares}$$

$$\text{Capa } 50 - 90 \text{ cm: } 10.00 \text{ masa}\% \Rightarrow 1.65 \text{ bares}$$

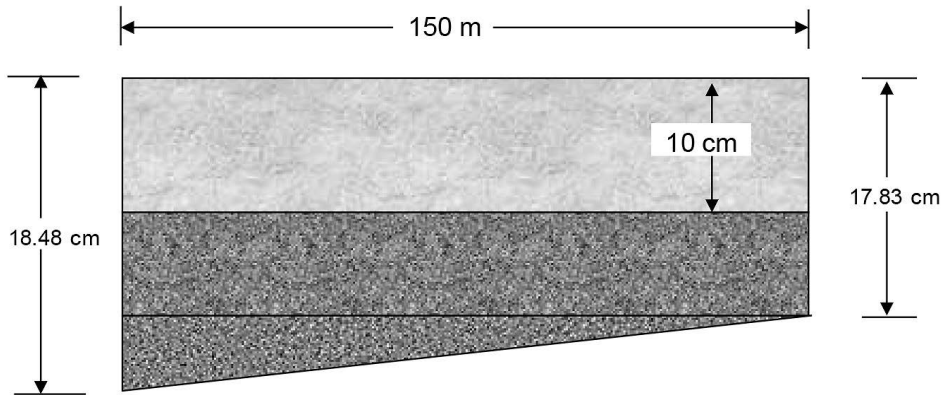
Para las condiciones de la costa peruana, se consideran aceptables estos estados de humedad antes del riego. En efecto, una zona deficitaria de agua puede considerarse aceptable hasta un estado energético de 3 bares.

Sobre la base de los datos dados, las funciones de avance y recisión o merma que se halló son:

$$X = 13.13 t_a^{0.6732} \dots\dots\dots \text{F. Avance}$$

$$X_m = 18.75 t_m^{0.8256} \dots\dots\dots \text{F. Merma}$$

Las láminas infiltradas para $t_r = 6$ horas, serán:



$$t_r = 360 \text{ min}$$

$$t_a = 0$$

$$t_m = 0$$

$$t_o = 360 \text{ min}$$

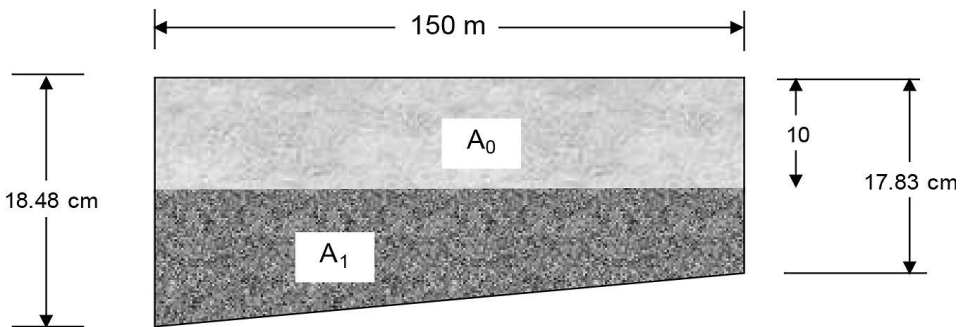
$$t_r = 360 \text{ min}$$

$$t_a = 37.1 \text{ min}$$

$$t_m = 12.4 \text{ min}$$

$$t_o = 335.3 \text{ min}$$

Como la lámina a ser aplicada en el riego es de solo 10 cm; luego



$$A_o = 150 (10) = 1500$$

$$A_1 = 150 (7.83) + 150 (0.32) = 1222.5$$

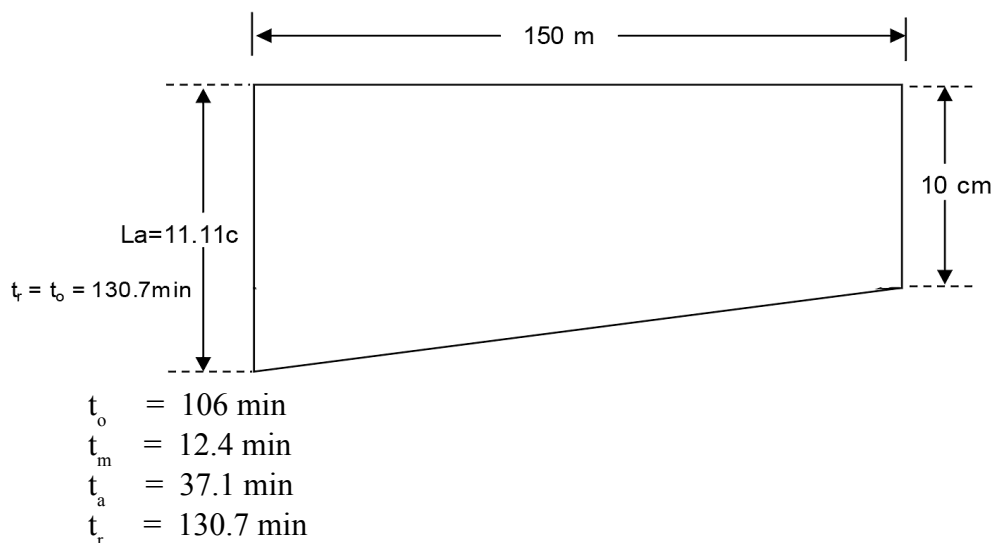
La eficiencia de aplicación (E_{ap}) será:

$$E_{ap} = \frac{A_0}{A_0 + A_1} * 100 = 55.1\%$$

Rpta:

Luego, el riego que se viene aplicando en la zona se hace con muy baja eficiencia (55.1%) y el estado energético al momento del riego es aceptable.

Tiempo de riego que se recomendaría y m³ / Ha



Si se conoce que: $t_r = t_o + t_a - t_m = 130.7 \text{ min}$

Redondeando, se obtendrá: $t_r = 130 \text{ min}$

La E_{ap} para estas condiciones será = 94.7%

Luego, la lámina bruta (L_B) a ser aplicada a nivel parcelario será:

$$L_B = \frac{10}{0.97} = 10.555 \text{ cm}$$

que expresado en m³ / Ha será : 1,055.5 m³ / Ha

Redondeando, se tendrá:

V = 1,050 m³ / Ha

Rpta.

CAPÍTULO VIII

PROGRAMACIÓN DE RIEGOS

En el riego de los cultivos, se trata de resolver las siguientes interrogantes:

¿Cuándo regar?, ¿Con cuánto regar?, ¿Cuál es la duración de la aplicación del riego? y ¿Cómo regar?. La pregunta **cuándo regar** se refiere a la frecuencia o al intervalo de tiempo entre riego y riego (días u horas); **cuánto regar**, a la cantidad de agua que se aplica en cada riego (m^3/ha); **la duración de la aplicación del riego**, al tiempo en que se aplica el riego (horas o minutos) y finalmente cómo regar, a la forma o al método como se aplica el agua de riego, que puede ser por gravedad (surcos o melgas), aspersión, goteo entre otros. La respuesta a todas estas interrogantes debe conducirnos a la maximización de los beneficios; es decir al mayor nivel de eficiencia del uso de agua en el riego de un cultivo.

Cuando el recurso agua abunda y su costo es mínimo, el riego puede aplicarse de forma tal que permita obtener el máximo rendimiento del cultivo. Por el contrario, cuando el agua es escasa y su costo es significativo, el riego puede aplicarse de forma tal que el obtener rendimientos menores al máximo pueda generar un mayor beneficio. En todo caso, la meta será siempre la de maximizar el beneficio, lo cual dependerá de la solución adecuada a las interrogantes inicialmente mencionadas.

Para resolver las preguntas, antes planteadas, será necesario tener en cuenta los siguientes elementos: profundidad de raíces de los cultivos, capacidad de retención de humedad del suelo, la evapotranspiración de los cultivos,

la precipitación, las características fisiológicas del cultivo al déficit de agua y a la calidad del agua, calidad de las aguas, características del clima, disponibilidad de recursos económicos para invertir en el método o sistema de riego, mano de obra, disponibilidad de agua, precio de los insumos o costos de producción y precio de venta de los productos obtenidos, entre otros elementos.

En forma general, el riego debe aplicarse teniendo en cuenta como base la disponibilidad y el costo del agua, las características fisiológicas del cultivo y su respuesta a la disponibilidad de agua según su edad, variedad, etc.

En el riego por gravedad, la lámina de agua a ser aplicada dependerá de la capacidad de retención del suelo, profundidad de raíces, déficit de humedad o déficit de humedad permisible, la eficiencia con la que se aplica el riego y la disponibilidad de agua.

Cuando el riego es frecuente (cada 1 a 3 días), la lámina de agua a ser aplicada dependerá del consumo diario del cultivo y de la eficiencia con la que se aplica. Es decir, en esta situación, la lámina de riego ya no depende de la capacidad de retención del suelo; pues se asume que el nivel de humedad en el suelo está cercano a la capacidad de campo. En zonas con alta evapotranspiración potencial y cuando se tienen cultivos sensibles a los déficits de humedad y un sistema de riego por goteo, se recomienda incluso que la lámina de agua sea aplicada en forma fraccionada a lo largo de un mismo día (2 a 4 aplicaciones) a fin de evitar que se incremente el déficit de humedad o el estrés hídrico en el cultivo, tratando de mantenerlo en el nivel óptimo del potencial o estado energético del agua en el suelo.

8.1 Déficit permisible de humedad en el suelo

Se considera que la cantidad de agua existente en un suelo entre la humedad a capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP) constituye el agua disponible total para las necesidades fisiológicas del cultivo. A medida que el agua disponible en el suelo es consumida por el cultivo, su velocidad de crecimiento y su consumo de agua disminuye; debido a que el potencial del agua en el suelo —fuerza con la que es retenida

el agua— aumenta y consecuentemente se hace menos disponible para el cultivo. En forma práctica, y especialmente para el diseño de proyectos de riego, se calcula la frecuencia de riegos y la demanda de agua del proyecto, asumiendo un consumo de hasta 50% de la humedad aprovechable total o agua disponible total para la época de mayor consumo de agua.

8.2 Momento óptimo del riego

El momento óptimo de riego representa el máximo porcentaje del volumen de agua disponible en la zona de raíces y que el cultivo pueda aprovechar al máximo su potencial sin reducir su rendimiento. Este nivel de agua disponible y aprovechable por la planta depende del tipo de cultivo, de la textura del suelo, de la pendiente del terreno, de su nivel de salinidad y del sistema de riego que se use.

Conocer el momento óptimo en que se debe aplicar el riego, sirve para la planificación del sistema de riego, para conocer el volumen de agua que se necesita y la frecuencia de riego. Todo ello permitirá dimensionar la capacidad de conducción y distribución del sistema de riego.

El momento óptimo de riego se puede definir en términos energéticos o de potencial del agua en el suelo. En el Cuadro N° 1, se presenta un listado de cultivos y su correspondiente estado energético óptimo del agua en el suelo, que permite su máxima producción. Para el caso de suelos arenosos, estos niveles de estado energético pueden ser aún menores que los presentados en el cuadro N°1. En el Cuadro N° 2, se presenta la interpretación aproximada de los diferentes niveles de potencial hídrico.

Es de resaltar que cada cultivo tiene una respuesta diferente al riego, sobre todo en la etapa de maduración, como es el caso del espárrago y de la caña de azúcar entre otros que requieren un stress hídrico para facilitar el trasloque y concentración de azúcares u otros productos sintetizados en el tallo. Por ello, es fundamental conocer detalladamente la respuesta del cultivo a los diferentes niveles de humedad y en sus diferentes estadios fisiológicos. Sobre la base de ello, se debe manejar el riego de los cultivos a fin de lograr los mejores resultados en cantidad y calidad del producto obtenido.

Cuadro N°1.- Momento óptimo del riego de los cultivos

Tipo de cultivo	Estado energético o tensión del agua en el suelo (bar)
Papa	0.30 – 0.50
Zanahoria	0.50 – 0.60
Melón	0.35 – 0.50
Lechuga	0.40 – 0.50
Fresa	0.30 – 0.40
Coliflor	0.50 – 0.70
Col	0.50 – 0.70
Cebolla china	0.40 – 0.55
Cebolla de bulbo	0.50 – 0.70
Caña de azúcar	0.30 - 0.45
Remolacha azucarera	0.40 – 0.55
Cítricos	0.40 – 0.70
Mango	0.60 – 0.80
Palta	0.40 – 0.55
Espárrago	0.30 – 0.45
Pasto, acelga	0.30 – 0.40
Tomate	0.50 – 0.70

Cuadro elaborado en base a la información contenida en: Haise H.R. & Hagan R.M., 1967, Soil, plant and evaporative measurements as criteria for scheduling Irrigation in Agronomy #11, A.S.A., USA.

Hargreaves, C. H. and Samani, Z.A. 1991. Irrigation Scheduling, programación del riego. Editts, P.O. Box 208 Las cruces, New México y la propia experiencia personal de los autores.

Cuadro N°2.- Interpretación del nivel de potencial hídrico

Potencial (Bar)	Interpretación
0.0 – 0.1	Cerca de la saturación. Elevado nivel freático o encharcamiento, falta de aireación. Afecta a la mayoría de los cultivos, excepto al arroz u otras plantas tolerantes al exceso de agua.
0.11 – 0.33	Capacidad de Campo. A este nivel se termina el riego para evitar pérdidas de agua por percolación profunda y lavado de nutrientes por debajo de las raíces de la planta. En suelos arenosos la CC se alcanza a la tensión de 0.2 – 0.3 bares y los suelos arcillosos, a la tensión de 0.11 – 0.20
0.30 – 0.60	En suelos arenosos, el riego se debe aplicar cuando la tensión del agua en el suelo esté entre 0.2 – 0.4 bares, según el cultivo. Para suelos de textura franca, entre 0.3 – 0.5 y para suelos arcillosos entre 0.2 – 0.6 bares. La aplicación del riego dentro de dichos rangos de tensión de humedad del suelo, asegura una óptima disponibilidad de agua para el cultivo.
0.50 – 0.70	Comienzo del “stress hídrico” en la planta. Para suelos arenosos se inicia a 0.5 bares y para suelos arcillosos a los 0.7 bares. En muchos casos el stress no se manifiesta visiblemente en la planta ni causa una reducción significativa en el rendimiento.
2.0 – 5.0	Stress hídrico acentuado, afecta en forma considerable a la productividad del cultivo, reduciéndola.
15.0	Punto de marchitez permanente (PMP). A este nivel de humedad, el cultivo sufre daños fisiológicos irrepetibles, causando en muchos casos la muerte.

Elaboración propia

8.3 Programación de riegos

En una programación de riegos de los cultivos, se busca resolver las interrogantes: ¿Cuándo regar? y ¿cuánta cantidad de agua se recomienda aplicar en el riego? La solución a estas preguntas implica conocer la disponibilidad de agua con que se cuenta, tanto en cantidad como en oportunidad.

Si se dispone de poca cantidad de agua y por turnos, ambas preguntas se resolverán automáticamente. Es decir, se regará cuando le corresponda su turno de agua y la cantidad a ser aplicada será igual a la cantidad de agua que le corresponda en su turno; salvo que la dotación de agua que le

corresponda sea almacenada en un reservorio y se pueda regular de esta manera el manejo de agua en el riego, según sus necesidades.

Si se dispone de una cantidad adecuada de agua sobre la base de la demanda, la interrogante de **cuándo regar**, se resolverá aplicando el agua de riego en el momento óptimo, es decir cuando el estado energético del agua en el suelo permita el máximo rendimiento del cultivo. La interrogante de ¿cuánta cantidad de agua se recomienda aplicar en el riego? se resolverá restituyendo el agua del suelo hasta su capacidad de campo y según su requerimiento de lavado de sales si fuera necesario. Esta situación es aplicada sólo por un mínimo número de agricultores, especialmente de cultivos de exportación; pues en la mayoría de los casos, los agricultores deciden **cuándo regar**, basándose en su “experiencia”, ya sea ganada con su trabajo, observando a otros agricultores o por referencia de sus antecesores. En cuanto a la cantidad de agua a ser aplicada en el riego, normalmente no es medida por falta de infraestructura, en consecuencia sólo es estimada al “ojímetro” por el regador. Esta acción trae como consecuencia, en la mayoría de casos, riegos excesivos que ocasionan problemas de drenaje y salinidad, que pueden ser observados en las partes bajas de los valles, así como el lavado de fertilizantes o nutrientes del suelo.

En forma general, para una adecuada programación de los riegos se requiere conocer la siguiente información:

- Capacidad de campo del suelo;
- Estado energético óptimo o déficit permisible de humedad en el suelo o zona de raíces;
- Profundidad efectiva de las raíces del cultivo;
- Consumo de agua o evapotranspiración real del cultivo;
- Edad del cultivo y sus características fisiológicas a los déficits de humedad;
- Necesidad de lavado de sales del perfil enraizado;
- Disponibilidad de agua para el riego;
- Aporte de agua a las necesidades del cultivo a partir de la napa freática;
- Precipitación efectiva; y
- Eficiencia de aplicación, de distribución y de riego.

Uno de los métodos más usados para la programación de los riegos es el método de balance hídrico. Éste consiste en efectuar el balance de agua en la zona de raíces. Este método se sustenta en las siguientes ecuaciones:

$$\theta_j = \theta_i + \Delta\theta_t$$

$$j > i$$

Dónde:

θ_i = Contenido de humedad inicial en la zona de raíces, que en condiciones normales debe ser igual a la Capacidad de Campo (CC) del suelo.

θ_j = Contenido de humedad final en la zona de raíces.

$\Delta\theta_t$ = Variación total del contenido de humedad en la zona de raíces, ocurrida desde el día i hasta el día j , llamándose también a este cambio total: “**Variación en el nivel del reservorio**”. Esta variación será cero (O) cuando el suelo está en CC, y será máxima cuando el suelo esté en punto de marchitez permanente (**PMP**).

$$\Delta\theta_t = Pe - Eta - P + Ac$$

Dónde:

Pe = Precipitación efectiva caída;

Eta = Consumo de agua por la planta (evapotranspiración real);

P = Pérdidas de agua: por lavado, ineficiencias, etc; y

Ac = Aporte de agua a la zona radicular a partir de la napa freática.

Cuando **(Pe + Ac) > (Eta + P)**, se considera para usar la ecuación de balance.

En el caso del riego por gravedad, las pérdidas de agua (P) se producen por percolación profunda y por drenaje superficial; mientras que en riego por aspersión las pérdidas se presentan debido al viento y a la evaporación.

Para la determinación del momento en que se debe regar, si se dispone de agua en cantidad adecuada, se hará definiendo el estado energético óptimo del agua en el suelo que más conviene al cultivo. Los cálculos se harán de la siguiente manera: El punto de partida será el contenido inicial de humedad $\theta_i = \theta_o$, que en condiciones normales corresponde a la Capacidad de Campo (CC); luego:

$$\theta_j = \theta_i + \Delta\theta_i$$

Como:
$$\Delta\theta_i = P e_i - E t a_i - P_i + A c_i$$

Asumiendo que: $P e_i = 0$ $P_i = 0$ y $A c_i = 0$

Luego:
$$\Delta\theta_i = -E t a_i$$

Lo cual significa que la “variación del nivel del reservorio” dependerá de la tasa de evapotranspiración real (Eta) del cultivo, cuando la precipitación efectiva (Pe), pérdida de agua (P) y el aporte capilar (Ac) son nulas. En estas condiciones, la ecuación de balance quedará:

$$\theta_1 = \theta_0 - \Delta\theta_1 = \theta_0 - E t a_1$$

$$\theta_2 = \theta_1 - \Delta\theta_2 = \theta_1 - E t a_2$$

$$\theta_3 = \theta_2 - \Delta\theta_3 = \theta_2 - E t a_3, \text{ etc.}$$

El momento óptimo de riego se determinará cuando el contenido de humedad final del suelo corresponda al estado energético definido como el óptimo. Para ello, previamente se habrá determinado una curva de retención en el laboratorio.

El cálculo de la cantidad de agua a ser aplicada en el riego se efectuará sobre la base del contenido de humedad a capacidad de campo, contenido de humedad final (que corresponde al estado energético definido como el óptimo), la eficiencia de aplicación, la profundidad de raíces y la cantidad de agua necesaria para mantener un nivel apropiado de sales en la zona de raíces. El tiempo de riego se determinará conociendo la ecuación de infiltración del suelo.

Para condiciones de la costa peruana y para el cultivo de la caña de azúcar, se determinó mediante una serie de trabajos de investigación una ecuación para calcular la evapotranspiración real de la caña de azúcar. La ecuación que se halló es la siguiente:

$$E_{ta} = \frac{1.17 E_0}{1 + \frac{\Psi^{1.5}}{4.8}}$$

Dónde:

E_{ta} : Evapotranspiración real (mm),

E_0 : Evaporación de tanque clase “A” (mm), y

Ψ : Estado energético del agua en el suelo (bares)

En las figuras 1 al 3, se presentan unos gráficos que permiten estimar el estado energético del agua en el suelo, el número de días transcurridos desde el último riego aplicado y la evapotranspiración real en función de la textura y la evaporación libre de tanque clase “A” para suelos con un nivel bajo de salinidad (conductividad eléctrica de la pasta de 0.500 mmhos/cm) y para textura arenosa, franca y arcillosa. Estas figuras han sido elaboradas sobre la base de modelos matemáticos que relacionaban el contenido de humedad del suelo, su correspondiente estado energético (bares), la textura y nivel de salinidad; así como la evapotranspiración real del cultivo y la evaporación libre de tanque clase “A”. Dichos modelos matemáticos fueron determinados para las áreas con cultivo de caña de azúcar de la Región La Libertad, y se obtuvieron como producto de minuciosos y amplios trabajos de investigación liderados por los científicos Dr. George Huz y Leo Eppink del ex **Instituto Central de Investigaciones Azucareras (ICIA)**.

Con esta metodología, se puede predecir fácilmente el estado de humedad de un suelo, su requerimiento de riego y el número de días que transcurrirán a partir del último riego para alcanzar el nivel de humedad deseado. Por ello, se puede decir que es una metodología para pronóstico de riego (Scheduling Irrigation).

Si la precipitación y el aporte de agua de la capa freática no existen, luego el contenido de humedad al inicio del día 2, será igual al contenido de humedad inicial (inicio del día 1) disminuido el consumo de agua que efectuó la planta durante el día 1. El cálculo se repite hasta que el contenido de humedad en la zona de raíces alcance el estado energético definido previamente como el óptimo. En este momento, se calculará la cantidad de agua que se aplicará en el riego, para lo cual se tomará en cuenta las necesidades de lavado, las eficiencias, etc.

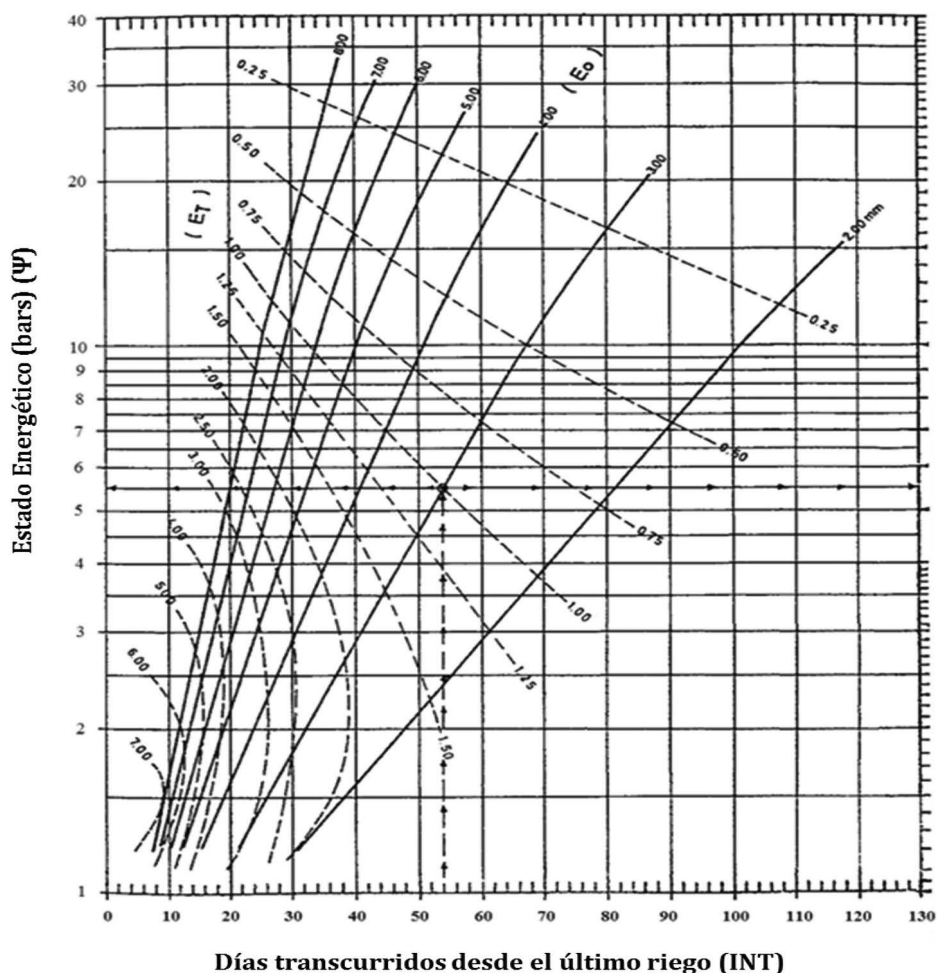


Figura N°1. Relación entre la evaporación de tanque clase “A” (E_o), días transcurridos, desde el último riego (INT), estado energético (Ψ) y la evapotranspiración real (E_t) para un suelo arenoso.

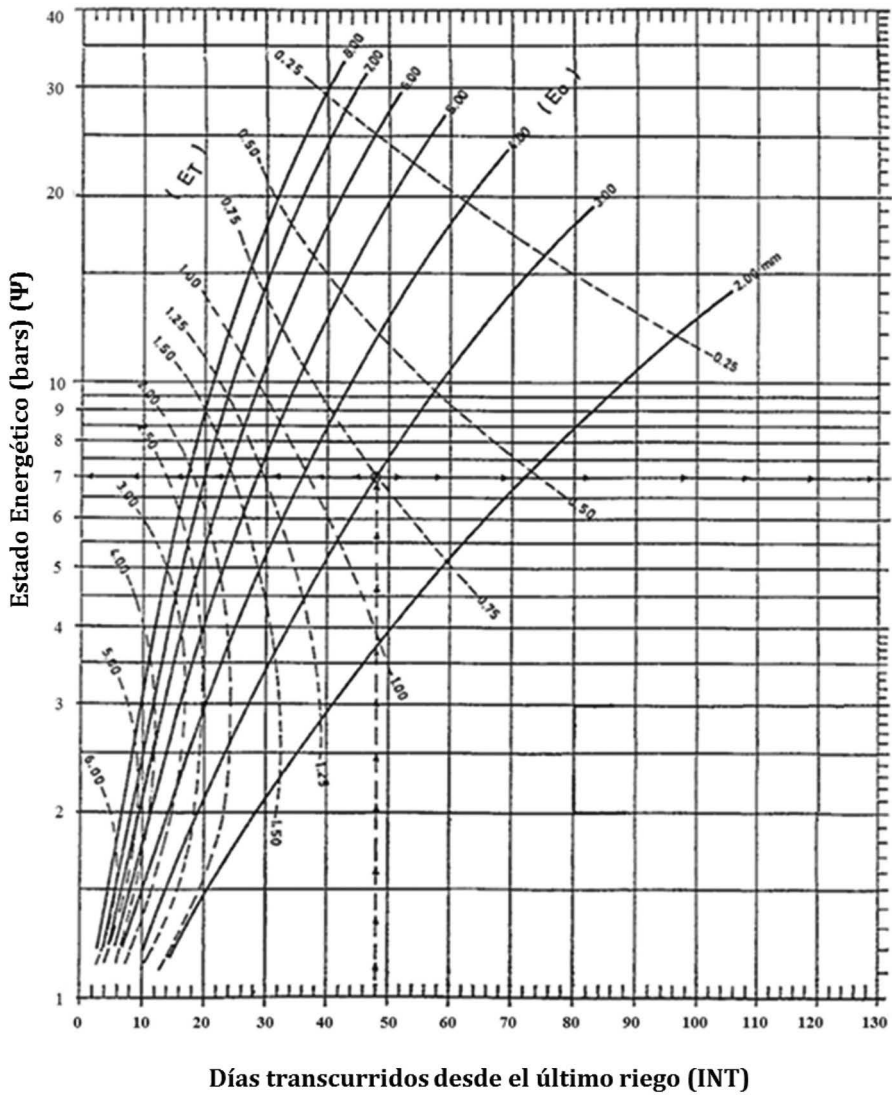


Figura N°2. Relación entre la evaporación de tanque clase "A" (E_o), días transcurridos, desde el último riego (INT), estado energético (Ψ) y la evapotranspiración real (E_t) para un suelo franco.

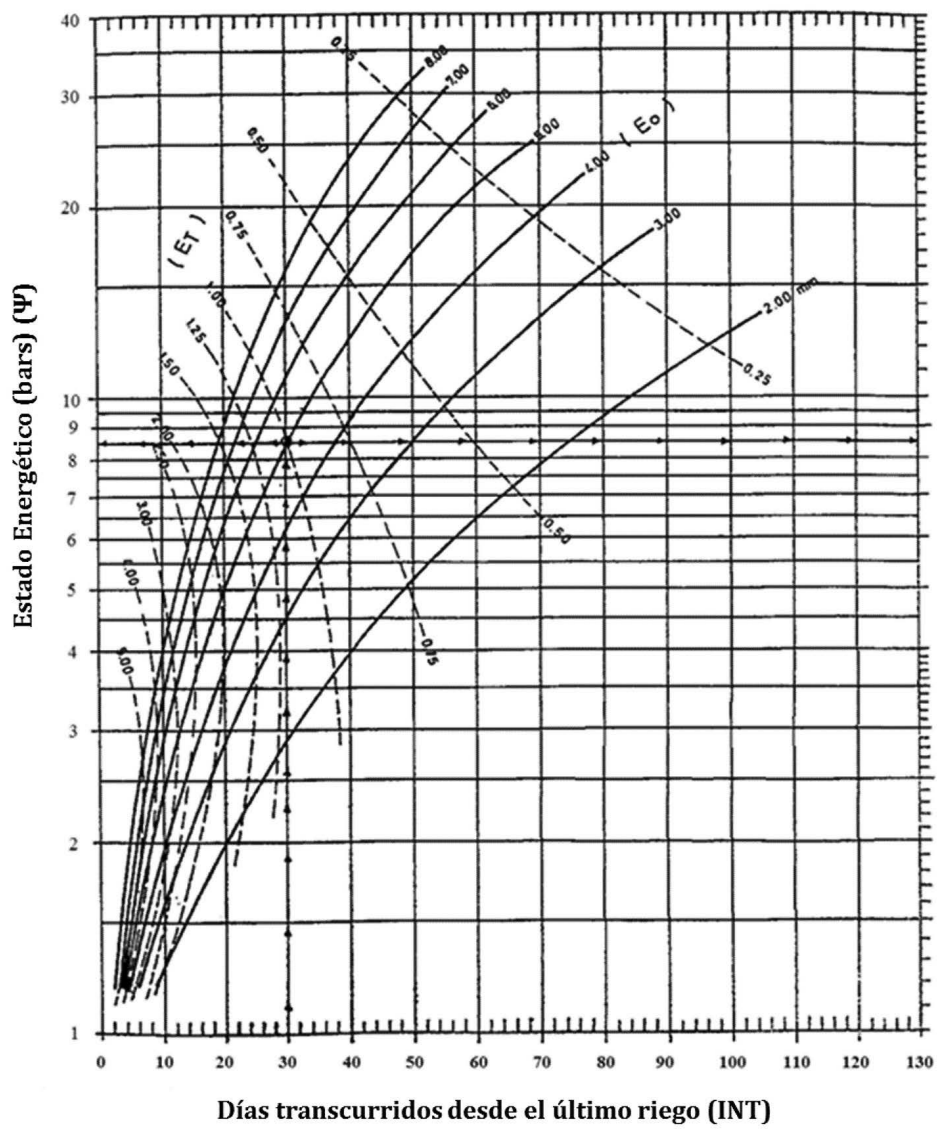


Figura N°3. Relación entre la evaporación de tanque clase “A” (E_o), días transcurridos, desde el último riego (INT), estado energético (Ψ) y la evapotranspiración real (E_t) para un suelo arcilloso

CAPÍTULO IX

VALOR ECONÓMICO DEL AGUA

9.1 Conceptos básicos

a) Función de producción

La función de producción es la expresión matemática que relaciona la cantidad de producto obtenido y la cantidad de insumos utilizados en el proceso productivo. La expresión general de una función de producción es de la forma:

$$Y = f(X_i) \dots\dots\dots (1)$$

b) Costo total (C_T)

El costo total es la suma de los costos fijos totales y los costos variables totales. El concepto de costo total es importante para el análisis de la producción y los precios, así como para el cálculo de los ingresos y de la rentabilidad de la unidad de producción.

$$C_T = C_{FT} + C_{VT} \dots\dots\dots (2)$$

c) Costo fijo total (C_{FT})

Está constituido por los gastos en que se incurren, independientemente del nivel de producción, y en un período de tiempo determinado.

Ejemplo:

- Costo de depreciación de un tractor o de una mochila que es independiente del nivel de producción.
- Costo de amortización de la maquinaria que se usa en la producción. Estos costos corresponden a una cantidad fija por unidad de tiempo y son independientes del nivel de producción.

d) Costo variable total (C_{VT})

Está constituido por los gastos en que se incurren según los niveles de rendimiento y producción. Es decir, el monto de estos costos depende de los niveles de producción y productividad que se esperen obtener. Ejemplo de estos costos son: Semillas, fertilizantes, alquiler de maquinaria agrícola, mano de obra, entre otros insumos.

$$C_{VT} = \sum p_i (X_i) \quad \dots\dots\dots (3)$$

Donde:

C_{VT} = Costo variable total;

p_i = Precio unitario del insumo i , y

X_i = Cantidad del insumo i

e) Costos unitarios (C_u)

Los costos unitarios o costo por unidad de producción son los más usados en la determinación de precios y nivel de producción óptima. En cualquier actividad productiva, sirven de base para la toma de decisiones.

Dentro de los costos unitarios, se tienen: Costo fijo promedio (C_{FP}), Costo variable promedio (C_{VP}), Costo promedio total (C_{PT}) y Costo marginal (C_{ma}). En la figura N° 1 adjunta, se presentan los diferentes tipos de costos unitarios.

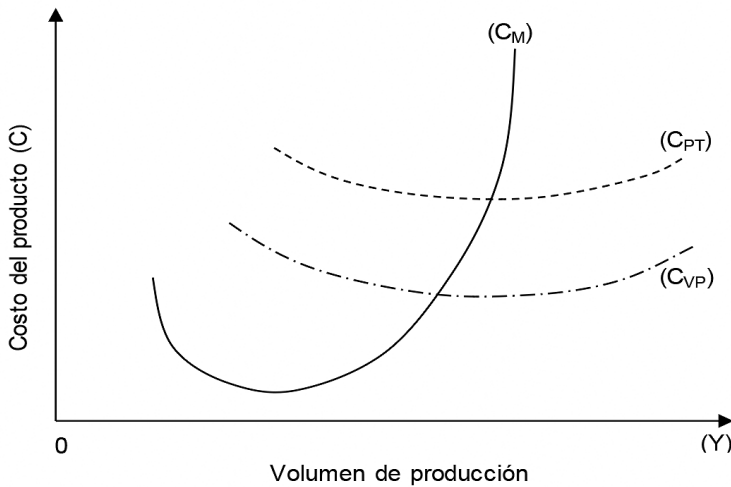


Figura N°1. Diferentes tipos de costos unitarios

f) Costo fijo promedio (C_{FP})

Es el Costo fijo necesario para producir una unidad de producto a cada nivel de producción. El costo fijo se obtiene dividiendo los costos fijos totales (C_{FT}) por la cantidad de producto logrado (Y) a un nivel de producción dado.

$$\boxed{C_{FP} = \frac{C_{FT}}{Y}} \dots\dots\dots (4)$$

Es importante resaltar que a medida que se aumenta la producción, el costo fijo por unidad de producto disminuye. Por lo tanto, una empresa que opera a altos costos fijos deberá obtener el mayor nivel de producción posible a fin de reducir estos costos.

g) Costo variable promedio (C_{VP})

Es el costo variable necesario para producir una unidad de producto a cada nivel de producción. Se obtiene dividiendo los costos variables totales (C_{VT}) por el correspondiente nivel de producción (Y).

$$\boxed{C_{VP} = \frac{C_{VT}}{Y}} \dots\dots\dots (5)$$

h) Costo promedio total (C_{PT})

Es el costo total necesario para producir una unidad de producto. Se obtiene mediante la suma de los costos fijos promedio (C_{FP}) y los costos variables promedio (C_{VP}) o también mediante la división del costo total (C_T) y el nivel de producción (Y) correspondientes. Es decir:

$$C_{PT} = \frac{C_T}{Y} = C_{FP} + C_{VP} \quad \dots\dots\dots (6)$$

i) Costo marginal (C_{ma})

Representa el costo adicional necesario para producir una unidad de producto adicional. También, puede ser definida como el costo variable total adicional necesario para obtener una unidad adicional de producto. Los costos marginales se relacionan solamente con los costos variables, es decir que en los costos marginales no se toman en cuenta los costos fijos.

En la toma de decisiones de una empresa, es de gran utilidad conocer los costos marginales.

j) Costo de oportunidad (C_o)

Representa el mayor valor que puede obtenerse por la utilización de un recurso en una actividad diferente a donde está siendo usada. También, puede ser definido como lo que el recurso ganaría o podría ganar, dentro de las varias posibilidades o alternativas de uso que pueda tener, asignándole finalmente la mejor alternativa.

El conocimiento del costo de oportunidad es muy importante; pues permite medir, comparativamente, la mejor alternativa de uso de los recursos para orientarlo hacia las actividades más rentables.

k) Ingreso total (I_T)

Se refiere al monto que ingresa a la empresa por concepto de la venta de la producción. El ingreso total resulta de la multiplicación de la cantidad

de producto por su respectivo precio unitario. Se expresa de la siguiente forma:

$$\boxed{I_T = p_y * Y} \dots\dots\dots (7)$$

Donde:

I_T = Ingreso total;

p_y = Precio de venta de cada unidad de producto; y

Y = Cantidad de producto vendido.

Ingreso neto (I_N)

Llamado también ganancia o utilidad, constituye la diferencia entre el ingreso total y el costo total. Cuando esta diferencia resulta negativa, se llama pérdida. Matemáticamente se expresa:

$$\boxed{U = I_N = I_T - C_T} \dots\dots\dots (8)$$

Donde:

I_N = Ingreso neto o utilidad neta (U);

I_T = Ingreso total o ingreso bruto total; y

C_T = Costo total.

Se debe resaltar que el objetivo fundamental de cualquier empresa es elevar al máximo sus utilidades y reducir al mínimo los costos y pérdidas.

m) Maximización de los ingresos netos o utilidades netas

La “maximización” de los ingresos netos implica una comparación, en varios posibles niveles de producción, entre ingresos y costos totales. El productor que desea maximizar sus ingresos netos debe tener un nivel de producción suficiente que le permita tener la mayor diferencia posible entre el ingreso total (I_T) y el costo total (C_T).

Las condiciones necesarias para la “maximización” del ingreso neto se establecen en términos de Ingreso marginal y Costo marginal.

Por definición se sabe que el ingreso neto total o utilidad neta se determina mediante la ecuación 8. Asumiendo que el costo total sólo depende de la cantidad total del insumo utilizado (X_1), y del precio unitario de dicho insumo (p_1), entonces (para este caso se asume que se cuenta con un solo insumo) la ecuación 8 puede ser modificada a la siguiente:

$$U = I_N = p_y * Y - p_1 * X_1 \quad \dots\dots\dots (9)$$

Donde:

- U = Utilidad neta;
- p_y = Precio unitario del producto Y;
- Y = Cantidad de producto obtenido o vendido;
- p_1 = Precio unitario del insumo utilizado X; y
- X_1 = Cantidad total del insumo utilizado.

La maximización de la utilidad se obtendrá cuando la primera derivada de la ecuación anterior se iguale a cero. Así:

$$\frac{dU}{dX_1} = p_y \left(\frac{dY}{dX_1} \right) - p_1 = 0$$

Desarrollando la ecuación anterior, se obtiene:

$$p_1 = p_y \frac{dY}{dX_1} \quad \dots\dots\dots (10)$$

Ello significa que la máxima utilidad o beneficio se logra cuando el precio del insumo (p_1) es igual al valor de la productividad marginal. Expresado de otra manera, también, se puede afirmar que la máxima utilidad se obtiene cuando la relación de precios del insumo y del producto equivalen a la productividad marginal; es decir:

$$\frac{p_1}{p_y} = \frac{dY}{dX_1} \quad \dots\dots\dots (11)$$

n) Ingreso marginal (I_{ma})

El ingreso marginal se define como el aumento del ingreso, dividido por el aumento del producto; es decir:

$$I_{ma} = \frac{\Delta I}{\Delta Y} = \frac{dI}{dY} \quad \dots\dots\dots (12)$$

Como el costo marginal (C_{ma}) es igual a la pendiente de la curva de costos totales; y, además, el ingreso marginal (I_{ma}) es igual a la pendiente de la curva de Ingresos Totales (I_T); luego el ingreso se maximiza cuando:

$$\text{Costo marginal} = \text{Ingreso marginal} = \text{Precio del producto}$$

Es decir:

$$C_{ma} = I_{ma} = P_y \quad \dots\dots\dots (13)$$

o) Productividad total (P_T)

Conocida también como la producción total, expresa la cantidad obtenida de producto (Y) a los diferentes niveles de insumo utilizado (X).

p) Productividad media (P_{me})

Resulta de dividir la productividad total o producción total (Y) entre la cantidad total de insumo utilizado (X_1). Matemáticamente, se representa como:

$$P_{me} = \frac{Y}{X_1} \quad \dots\dots\dots (14)$$

q) Productividad marginal (P_{ma})

La productividad marginal es la relación entre las variaciones de la productividad total y la cantidad total del insumo utilizado. También, se define como la variación que tiene la productividad total o producto

total por cada unidad adicional de insumo utilizado. Matemáticamente, se representa:

$$P_{ma} = \frac{dY}{dX} \dots\dots\dots (15)$$

r) Productividad o producción máxima

La producción máxima, llamada también óptimo físico u óptimo técnico, representa la máxima cantidad de producto (Y) que puede obtenerse mediante la utilización del insumo (X). Matemáticamente, se puede determinar la producción máxima, hallando la primera derivada de la función de producción e igualándola a cero; luego:

$$\frac{dY}{dX} = 0 \dots\dots\dots (16)$$

s) Ley de la oferta y la demanda

La oferta de un bien o de un servicio está en función directa a su precio. Es decir, cuanto más alto sea el precio, mayor será la atracción o incentivo para producir más; y, por lo tanto, mayor será la cantidad de producto o servicio a ofertar.

La demanda de un bien o de un servicio tiene una variación inversa con el precio. Significa que a un mayor precio del producto o servicio, la demanda será menor o viceversa. El punto de intersección de las curvas de Oferta y Demanda se conoce también con el nombre de punto de equilibrio, y determina el precio del bien en el mercado. En la figura N° 2, se muestra la variación del precio del producto y el volumen de producción.

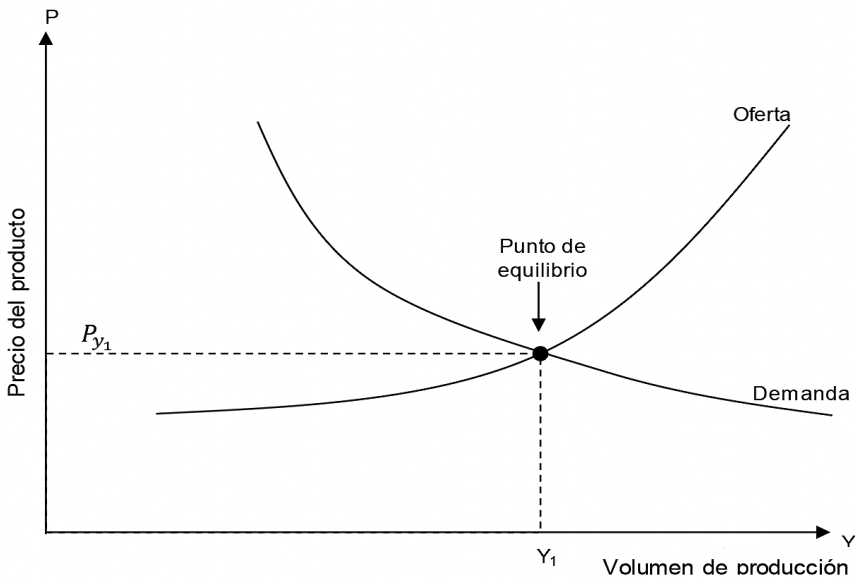


Figura N°2.- Variación del nivel de producción y el precio del producto

9.2 Aspectos generales de una función de producción

La función de producción es una relación matemática entre la producción obtenida (Y) y los factores de producción o insumos utilizados (X_i). Se destaca entre ellos el insumo o recurso agua.

El conocimiento de la función de producción es sumamente importante, pues así se puede seleccionar el nivel óptimo de producción o el uso de los diversos insumos a fin de maximizar sus beneficios. También es de utilidad su conocimiento para formular políticas gubernamentales relacionadas con estos temas.

La función de producción sobre la base de dos insumos se expresa matemáticamente por la forma:

$$Y = f(X_1 / X_2) \quad \dots\dots\dots (17)$$

Donde:

Y = Representa la cantidad de producción obtenida;

X_1 = Factor de producción variable;

X_2 = Factor de producción fijo.

La representación gráfica de esta función no es una curva, sino una superficie - superficie de respuesta - y se representa en un gráfico tridimensional, tal como se muestra en la figura N° 3.

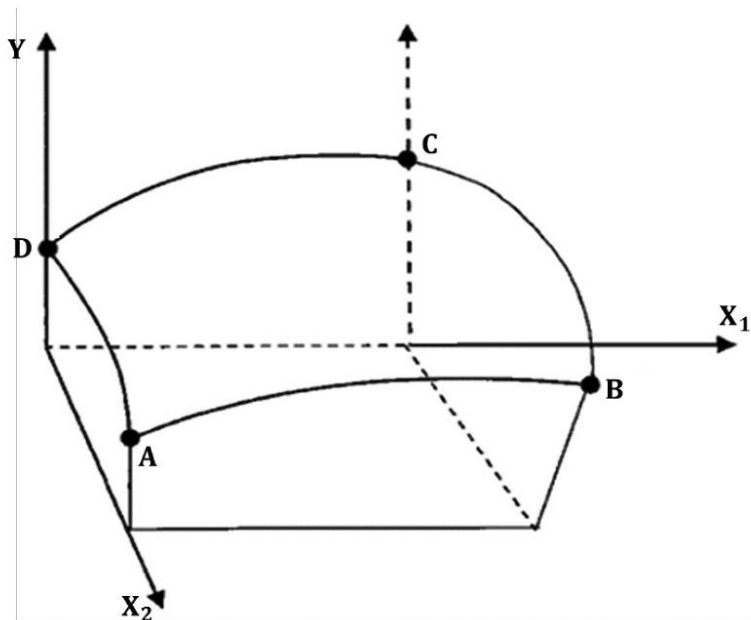


Figura N°3.- Superficie de respuesta de una función de producción

Donde se puede ver que para obtener Y cantidad de producto, se utiliza la cantidad correspondiente de los insumos X_1 y X_2 .

La superficie de producción es la superficie ABCD, también conocida como la “superficie de respuesta” a las diferentes combinaciones de utilización de los insumos. Cuando se utiliza más de un insumo, la expresión matemática es de la forma:

$$Y = f (X_1, X_2, X_3, X_4 X_n) \quad \dots\dots\dots (18)$$

Es preciso señalar que es difícil estudiar la influencia simultánea de dos o más insumos diferentes en la producción de un cultivo cualquiera. Para hacer posible el estudio de los factores, se supone que varía uno de ellos; y el resto se mantiene constante.

Por ejemplo, si se quisiera estudiar la influencia del insumo agua en la producción de un cultivo cualquiera, la función de producción quedaría expresada de la siguiente manera:

$$Y = f (X_1, /X_2, X_3, X_4 X_n) \quad \dots\dots\dots (19)$$

Donde la cantidad de X_1 (insumo agua) varía, pero se mantienen constantes todos los demás insumos.

Normalmente, las funciones de producción en el área agropecuaria donde se utiliza más de un insumo en un proceso productivo se ajustan a las funciones cuadráticas, polinomiales u otras. Para la determinación de la función en sí, se utilizan programas o softwares ya elaborados, previo análisis por el investigador o responsable a fin de seleccionar el adecuado. Luego, se va ajustando el modelo con la información básica obtenida en campo, hasta que se tenga finalmente la función definitiva; es decir, la función de producción.

9.3 Tipos de funciones de producción

Existen tres tipos de relaciones que se pueden observar en la producción de un bien determinado.

a) Relación de rendimientos constantes

Cuando es posible que la cantidad de producto obtenido se incremente en una misma proporción por cada unidad adicional de insumo variable utilizado. La representación gráfica se muestra en la figura N° 4.

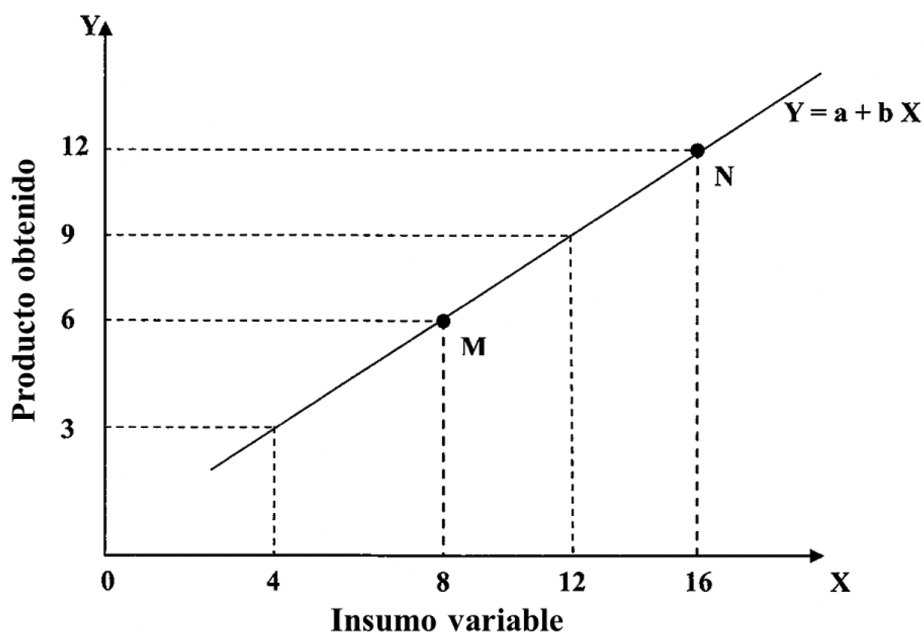


Figura N°4.- Relación producto – Insumo variable

En este caso, la relación es de tipo lineal cuya tangente o pendiente es constante, y cuyo valor equivale al factor b de la ecuación anterior.

b) Relación de rendimientos crecientes

Cuando al aumentar una unidad más de insumo, los incrementos en la cantidad de producto obtenido son cada vez mayores. La pendiente o tangente de la función también es cada vez mayor. La representación gráfica se muestra en la figura N° 5.

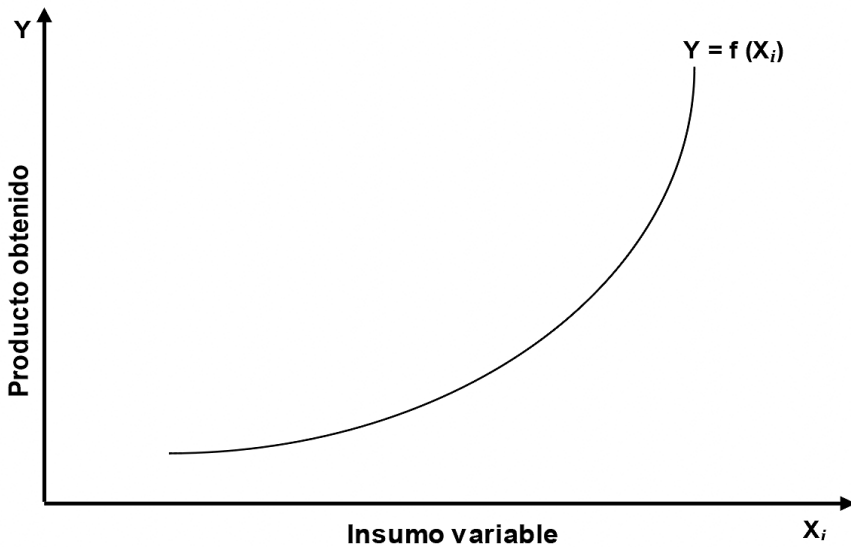


Figura N°5.- Relación de rendimientos crecientes

c) Relación de rendimientos decrecientes

Cuando a partir de un punto determinado, al considerar una unidad adicional de insumos, los incrementos en la cantidad de producto obtenido son cada vez menores. Esta es la característica típica de las funciones de producción en la actividad agropecuaria. Por ejemplo, en la crianza de pollos o en el engorde de vacunos o cerdos, a partir de un momento determinado, el incremento de peso por unidad de alimento consumido se va haciendo cada vez en menor proporción. Ello obliga a tomar decisiones para poder determinar el momento óptimo en que convenga sacrificar a los animales y enviarlos al mercado. La representación gráfica se muestra en la figura N° 6.

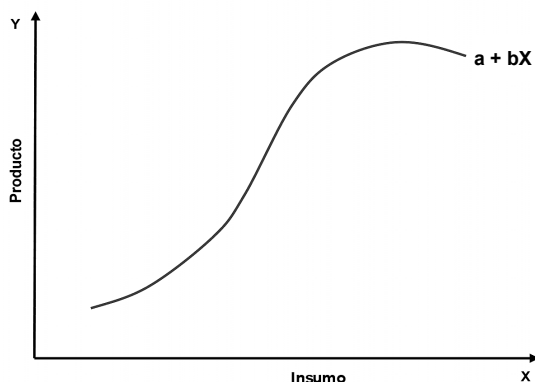


Figura N°6.- Relación de rendimientos decrecientes

Analizando este tipo de función de producción para un caso concreto del cultivo de caña de azúcar, se puede afirmar que:

Si la producción es caña de azúcar (Y) y el insumo a ser analizado es el agua (X_1), asumiendo que el resto de variables se mantienen constantes, se puede observar que en una primera etapa a medida que se incrementa el uso del insumo agua (X_1), la producción de azúcar (Y) aumenta; pero sólo hasta un cierto nivel, ya que después los aumentos en el uso del insumo (X_1) sólo contribuyen a una disminución en la producción (Y), ya sea por excesos de agua, ocasionando problemas de drenaje, o por lixiviación de los fertilizantes a niveles más profundos, fuera del alcance de las raíces del cultivo.

9.4 Etapas de una función de producción

Toda curva de producción total (P_T), producción media (P_{me}) y producción marginal (P_{ma}) puede ser dividida en tres etapas, de las cuales sólo una de ellas puede ser identificada como la etapa eficiente de producción.

- **Etapa I:** En este intervalo, tanto la producción media como la producción marginal son crecientes a medida que aumenta el uso del insumo. La producción marginal será máxima en esta etapa.
- **Etapa II:** En esta etapa, la producción media es máxima, y luego junto con la producción marginal son decrecientes; pero, positivas. La

producción marginal disminuye hasta el punto en que se hace cero. La producción total será máxima en esta etapa, en consecuencia aquí debe ocurrir la producción.

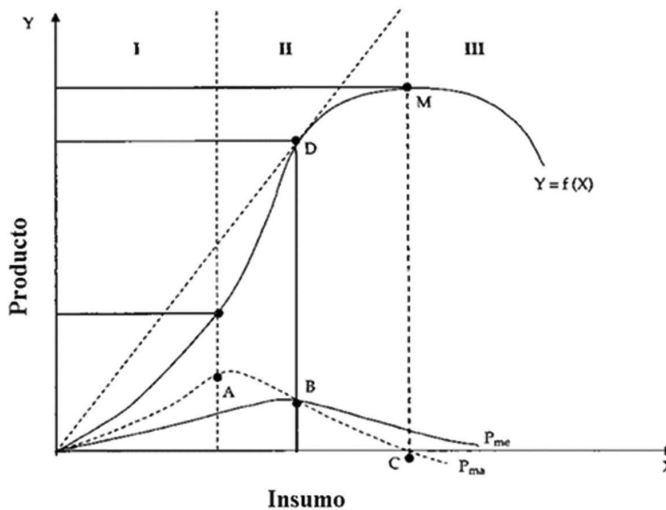
- **Etapas III:** En esta etapa, la producción total comienza a disminuir y la producción marginal es negativa.

Las etapas I y III son ineficientes, y son llamadas también zonas de producción irracional, por lo tanto la etapa II constituye la única etapa de eficiente producción. En la figura N° 7, se observan las etapas de la función de producción antes mencionadas.

Normalmente, la mayoría de productores agropecuarios combinan sus factores de producción o insumos en proporciones tales que operan normalmente en las etapas I ó III de la función de producción. Esto se debe a que no tienen un conocimiento claro de las relaciones de producción. Así pues, es común encontrar que en muchos cultivos no se alcanza la Etapa II por no emplear suficiente cantidad de fertilizantes, aplicar en exceso o menor cantidad de agua que la necesaria, entre otras causas.

Para la determinación de la cantidad óptima de insumos que se debe utilizar en una actividad productiva; se requiere conocer, además de la función de producción, los precios de los insumos y del producto obtenido.

Figura N°7.- Etapas de una función de producción



9.5 Combinación óptima de insumos

Asumiendo que un productor usó sólo dos insumos: X_1 y X_2 cuyos precios unitarios son p_1 y p_2 respectivamente. Además, se conoce que el presupuesto disponible para adquirir los insumos es P . En la figura N° 8, se muestra una línea de Isocosto.

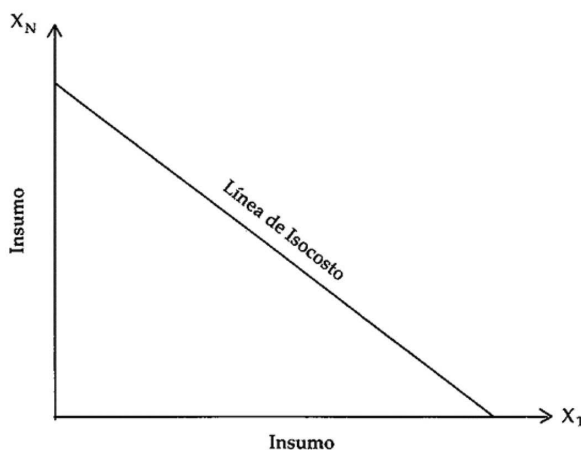


Figura N°8.- Representación de una línea de Isocosto

Esta línea representa todas las posibles combinaciones de la utilización de los insumos X_1 y X_2 , y con el mismo costo o presupuesto.

La ecuación de la línea de Isocosto está dada por:

$$X_1 * p_1 + X_2 * p_2 = P$$

La pendiente de la línea de Isocosto (m) está dada por la relación:

$$m = \frac{P/p_2}{P/p_1} = \frac{P}{p_2} * \frac{p_1}{P} = \frac{p_1}{p_2}$$

La combinación óptima de recursos, tomando en cuenta sus precios unitarios, se obtiene en el punto donde la pendiente de la línea de Isocosto es igual a la pendiente de la línea de Isoproducto. Es decir:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{\Delta X_2}{\Delta X_1}$$

Expresado de otra forma, se escribe: $p_1 * (\Delta X_1) = p_2 * (\Delta X_2)$

Todo lo cual significa que la óptima combinación de insumos, para un nivel determinado de producción, se obtiene cuando la tasa marginal de sustitución () es igual a la razón inversa de sus precios. Es decir:

$$\boxed{\frac{\Delta X_2}{\Delta X_1} = \frac{p_1}{p_2}} \dots\dots\dots (20)$$

Esta relación se deduce a partir del concepto: “La combinación óptima de insumos se obtiene cuando el valor de la producción marginal (V_{PM}) es igual al precio de los factores de producción o insumos”. Es decir:

$$V_{PM} X_1 = p_1 \quad y \quad V_{PM} X_2 = p_2$$

al dividir ambas ecuaciones por los precios de los insumos (p_1 y p_2), se tiene:

$$\frac{V_{PM} X_1}{p_1} = \frac{p_1}{p_1} \quad y \quad \frac{V_{PM} X_2}{p_2} = \frac{p_2}{p_2}$$

Simplificando e igualando las expresiones anteriores, se tiene:

$$\boxed{\frac{V_{PM} X_1}{p_1} = \frac{V_{PM} X_2}{p_2}} \dots\dots\dots (21)$$

Dado que el valor de la producción marginal es igual a la producción marginal (P_M) multiplicado por su precio correspondiente del producto (p_y), luego, la ecuación anterior puede escribirse:

$$\frac{P_M X_1 (p_y)}{p_1} = \frac{P_M X_2 (p_y)}{p_2}$$

Simplificando la ecuación anterior, se tiene que:

$$\frac{P_M X_1}{p_1} = \frac{P_M X_2}{p_2}$$

Como la producción marginal es igual al cambio en la cantidad del producto obtenido, debido al cambio en la cantidad del insumo o factor de producción utilizado, es decir: $\Delta Y / \Delta X$, luego la ecuación anterior puede escribirse:

$$\frac{\frac{\Delta Y}{\Delta X_1}}{p_1} = \frac{\frac{\Delta Y}{\Delta X_2}}{p_2}$$

Asumiendo que ΔY para ambos casos es igual, y simplificando la ecuación anterior, se tiene:

$$\boxed{\frac{\Delta X_2}{\Delta X_1} = \frac{p_1}{p_2}} \quad \dots\dots\dots (22)$$

Lo que significa que la condición necesaria para la óptima combinación de los insumos en un determinado nivel de producción se obtiene cuando la tasa marginal de sustitución de los insumos, $(\Delta X_2 / \Delta X_1)$, es igual a la razón inversa de sus precios.

Todo lo anteriormente mencionado es válido para situaciones de productos e insumos homogéneos. Sin embargo, cuando se presenten diferencias en tecnología, las diferencias en la función de producción también aparecerán. En la figura N° 9, se muestran dos situaciones de funciones de producción física, con 2 diferentes niveles de tecnología.

La curva A muestra una función de producción que resulta de aplicar sucesivas unidades de mano de obra no calificada, mientras que la curva B, para mano de obra calificada. Para un nivel de insumos (X_0), se tiene dos niveles de producción (Y_0 e Y_1), siendo Y_1 mucho mayor que Y_0 debido sólo al mejor nivel de tecnología usada en la producción. Este tipo de análisis es de importancia para cualquier empresa de producción o proyecto, a fin de definir el tamaño adecuado y el nivel de tecnología a utilizar.

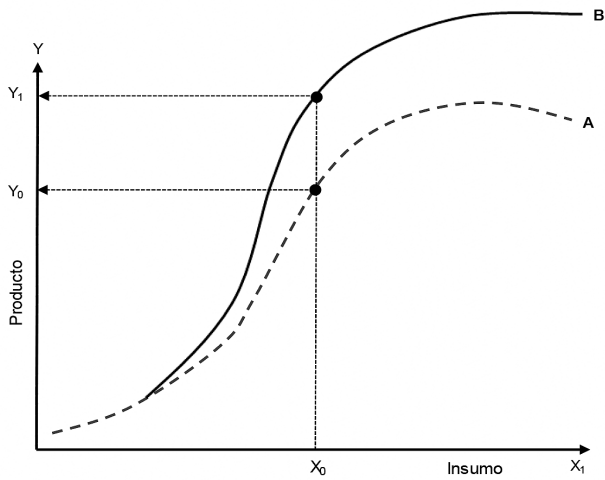


Figura N°9. Funciones de producción en dos niveles de tecnología diferentes

9.6 Análisis de una función de producción

Se analiza la función de producción sobre la base de un solo insumo, se asume que dicho insumo sea el recurso agua, la misma estará definida por:

$$Y = f (X)$$

..... (23)

En la figura N° 10, se muestra una función de producción típica.

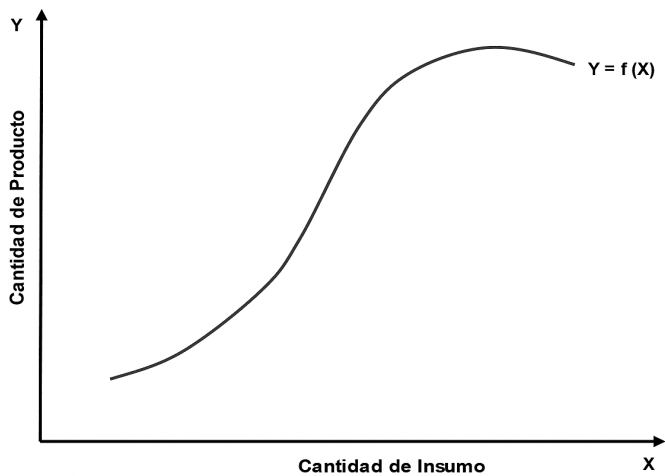


Figura N°10.- Función de producción típica

El máximo de la función de producción $f(X)$, máximo absoluto de la función, llamado también óptimo físico de producción, se determina derivando la ecuación anterior con respecto a la variable X e igualándola a cero; así:

$$\boxed{\frac{df(X)}{dX} = \frac{dY}{dX} = Y' = 0} \dots\dots\dots (24)$$

En la figura N° 11, se puede observar que a la izquierda del máximo de la función (punto C), la producción marginal dY / dX es positiva ($Y' > 0$), mientras que al lado derecho es negativa ($Y' < 0$).

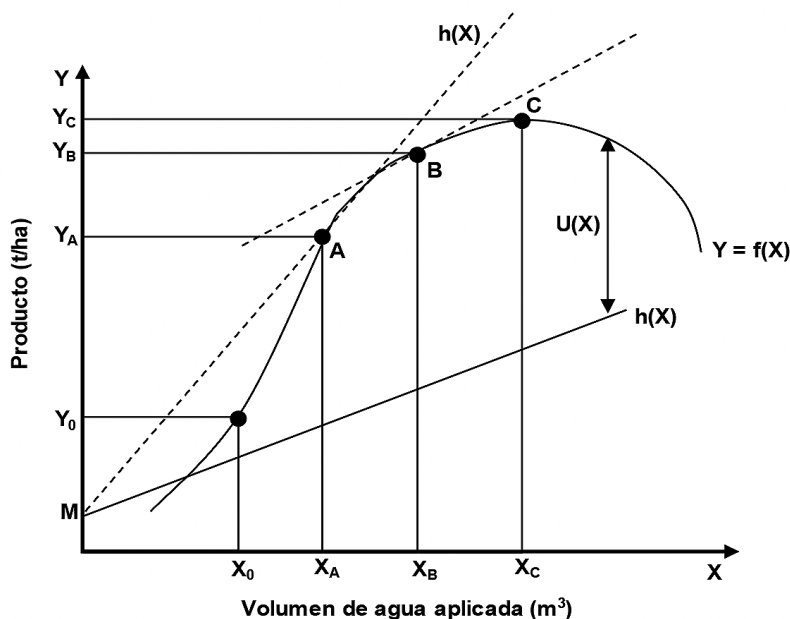


Figura N°11.- Relación producción – Agua aplicada, Costos de producción $h(X)$ y utilidad bruta $U(X)$

La función que relaciona el nivel de producción, según el volumen de agua utilizado, es expresada por:

$$g(X) = \frac{Y}{X} \quad \dots\dots\dots (25)$$

En la misma forma, el máximo absoluto de la función anterior que relaciona el nivel de producción, según el volumen de agua utilizado, $g(X)$, se determina derivándola con respecto a X e igualándola a cero.

$$\frac{dg(X)}{dX} = \frac{d}{dX} \left(\frac{Y}{X} \right) = \frac{XY' - Y}{X^2} = \frac{1}{X} \left(Y' - \frac{Y}{X} \right) = 0 \quad \dots\dots\dots (26)$$

De donde se obtiene que:

$$Y' = \frac{Y}{X} \quad \dots\dots\dots (27)$$

En la figura N° 12, se muestra la relación de cantidad de agua aplicada (X), la producción marginal (dY/dX), y la producción por volumen de agua aplicada [$g(x)$]. Aquí el punto D representa el valor máximo de la producción por volumen de agua aplicada.

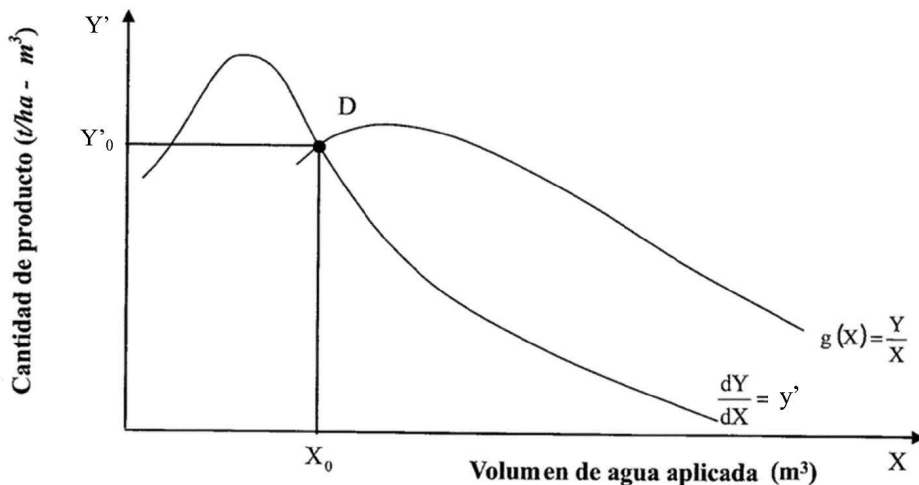


Figura N°12.- Relación de agua aplicada (X) – producción marginal (dY/dX), Producción por volumen de agua ($g(X)$)

Al lado izquierdo de este punto máximo (D), la producción marginal – Y' - es mayor que la producción por volumen de agua ($Y' > Y/X$), mientras que al lado derecho, la producción marginal es menor que la producción por volumen de agua ($Y' < Y/X$).

Esto significa que no es conveniente utilizar agua en terreno adicional hasta que no se haya alcanzado el punto máximo en la función $g(X)$ - punto D-, que representa la producción máxima por volumen de agua: Y' , ver Figura N° 12. Asimismo, no es recomendable aplicar más agua que la correspondiente al punto máximo de la función de producción $f(X)$ - punto C de la Figura N° 11 - que representa la producción máxima por unidad de superficie (Y_c). Los volúmenes de agua necesarios para alcanzar estos rendimientos se denominan con X_c y X_o respectivamente que se observan en las figuras N° 11 y 12, respectivamente.

Análisis de costos, ingresos y maximización de la utilidad

La utilidad por unidad de superficie regada (U) es igual a la producción por unidad de superficie (Y) multiplicado por la utilidad por unidad de producto (u).

$$U = Y * u \quad \dots\dots\dots (28)$$

Asimismo, esta utilidad también es igual al ingreso menos los costos de producción. El ingreso se obtiene multiplicando la producción por unidad de superficie, por su precio de venta (p). Los costos de producción se pueden desglosar por conveniencia del análisis, en costos de cultivo (c) y costos del agua aplicada; el mismo que está dado por el producto del precio unitario del agua (a) y la cantidad total de agua aplicada (X); luego:

$$U = pY - (c + aX) = pY - c - aX \quad \dots\dots\dots (29)$$

A mediano y largo plazo, una empresa se podrá mantener y desarrollar cuando la utilidad (U) es positiva. Es decir:

$$U \geq 0 \quad \dots\dots\dots (30)$$

Luego:

$$U = pY - c - aX \geq 0 \quad \dots\dots\dots (31)$$

que significa que los ingresos deben ser mayores o iguales que los costos de producción. De la ecuación anterior, se puede deducir:

$$pY \geq c + aX$$

Esta condición se logrará cuando los rendimientos o ingresos por unidad de superficie sean mayores que los costos totales de producción; luego:

$$Y \geq \frac{c}{p} + \frac{a}{p} X = h(X) \quad \dots\dots\dots (32)$$

En donde **h(X)** es la función que representa los costos de producción en función de la cantidad del agua aplicada; y depende, linealmente, de la cantidad de agua aplicada (X). La pendiente de la recta está determinada por el precio unitario del agua (**a**). En la figura 11, se representa la función **h(X)** donde se puede observar que, a medida que sube el precio unitario del agua (**a**), la función **h(X)** varía rápidamente y gira en el sentido antihorario, teniendo como punto base M que representa, en la figura, los costos fijos. En el punto donde la función **h(X)** es tangente a la función de producción **f(X)** - **punto A de la Figura 11**, los costos de producción se igualan al rendimiento o ingreso total. Significa que este punto corresponde al precio máximo que, empresarialmente, puede pagarse por el agua - **valor económico del agua** -, ya que es el punto a partir del cual la empresa ya no obtiene utilidad alguna.

En este punto, el valor de la derivada de la función del agua o función que representa los costos de producción en función de la cantidad del agua aplicada -**ecuación N° 32**- con respecto a la cantidad de agua utilizada será:

$$\frac{dY}{dX} = \frac{a}{p}$$

Ello representa el valor de la tangente o pendiente de la función del agua que constituye los costos de producción en función de la cantidad de

agua aplicada. Reemplazando este valor de la pendiente o tangente en la ecuación N° 32 y despejando, finalmente se obtiene:

$$\frac{a}{p} = \frac{dY}{dX} = \frac{Y - \frac{c}{p}}{X} = \frac{Y}{X} - \frac{c}{pX} \dots\dots\dots (33)$$

Por otro lado, de la figura N° 11, en forma genérica, la función utilidad por unidad de superficie regada se representará por:

$$U(X) = f(X) - h(X) \dots\dots\dots (34)$$

Reemplazando en la ecuación (34) los términos de las ecuaciones (23) y (32), se obtiene:

Es decir:

$$U(X) = Y - \left(\frac{c}{p} + \frac{a}{p} X \right) \dots\dots\dots (35)$$

Derivando la ecuación anterior con respecto a la cantidad de agua aplicada (X) e igualándola a cero, se obtienen los valores correspondientes al punto A, de la figura N° 11, que representa el valor máximo de la utilidad. Es decir, donde la recta **h(x)** es tangente a la función **f(X)**.

$$\frac{d}{dX} [U(X)] = \frac{dY}{dX} - \frac{a}{p} = 0 \dots\dots\dots (36)$$

Despejando de la ecuación anterior, se obtendrá:

$$\frac{dY}{dX} = \frac{a}{p} \dots\dots\dots (37)$$

9.7 Determinación del valor económico del agua

La cantidad óptima de agua aplicada es aquella que maximiza la utilidad total U_t de la actividad, luego:

$$U_t = U * S \quad \dots\dots\dots (38)$$

Donde:

- U_t = Utilidad total de la empresa,
- U = Utilidad por unidad de superficie regada,
- S = Superficie total regada.

Reemplazando la ecuación (29) en (38), se obtiene:

$$U_t = S (pY - c - aX) \quad \dots\dots\dots (39)$$

Para determinar el valor máximo de la U_t , se deriva esta función respecto a la cantidad de agua aplicada, y se iguala a cero. Es decir:

$$\frac{d(U_t)}{dX} = 0 \quad \dots\dots\dots (40)$$

El valor resultante de X representará la cantidad más económica de agua aplicada o la cantidad de agua que generará la máxima utilidad, y depende del factor limitante de la producción, que puede ser el recurso agua o recurso tierra. Cuando la superficie del terreno disponible es el factor limitante, y el agua abunda; empresarialmente, se tenderá a cultivar la máxima superficie de tierra disponible (S).

Derivando la ecuación (39) con respecto al insumo agua utilizando X e igualándola a cero, se maximiza la utilidad total:

$$\frac{dU_t}{dX} = \frac{d}{dX} [S(pY - c - aX)] = 0$$

Simplificando se obtiene:

$$S \left[p \frac{dY}{dX} - a \right] = 0 \quad \dots\dots\dots (41)$$

Despejando la ecuación anterior, se obtiene:

$$\frac{dY}{dX} = \frac{a}{p} \quad \dots\dots\dots (42)$$

Esta expresión es igual a la ecuación (37), significando que el punto donde se logra la máxima U_t corresponde también al punto **A de la figura 11**, donde la utilidad por unidad de superficie se maximiza, en este caso cuando el recurso agua abunda.

En zonas donde abunda el terreno, y el agua constituye el factor limitante de la producción; la distribución de agua se hará en forma distinta.

Si **V** es la cantidad total de agua disponible, **X** la cantidad de agua aplicada por unidad de área; entonces el agricultor puede regar una superficie determinada (**S**):

$$S = \frac{V}{X} \quad \dots\dots\dots (43)$$

Reemplazando esta relación en la ecuación (39) y a fin de hallar la utilidad total máxima, se deriva esta nueva expresión y se la iguala a cero, obteniéndose:

$$\frac{dU_t}{dX} = \frac{d}{dX} \left[\frac{V}{X} (pY - c - aX) \right] = 0 \quad \dots\dots\dots (44)$$

Desarrollando y simplificando la expresión anterior, se obtiene:

$$= v \left[\frac{d}{dX} \left(\frac{pY}{X} \right) - \frac{d}{dX} \left(\frac{c}{X} \right) \right] = 0$$

$$= v \left[\frac{p}{X} * \frac{dY}{dX} - \frac{pY}{X^2} + \frac{c}{X^2} \right] = 0$$

Despejando, finalmente, se obtiene que:

$$\boxed{\frac{dY}{dX} = \frac{Y}{X} - \frac{c}{pX}} \quad \dots\dots\dots (45)$$

En esta situación, el agricultor también aplicará el agua hasta el momento en que la suma del costo del agua y los otros costos de producción se igualan al rendimiento: **valor económico del agua** (punto a partir del cual la empresa queda sin ganancias).

PROBLEMAS DE APLICACIÓN

Problema N°1

La función de producción para el cultivo de maíz, obtenida de un trabajo de investigación es:

$$Y = 45.5 + 6.0X - 1.5X^2$$

Donde:

Y = Producción de maíz (quintales/ha)

X = Cantidad de úrea utilizada (quintales/ha)

Además, se sabe que el precio de venta del maíz es de S/. 6.2/kg y que el precio del insumo es de S/. 3.5/kg. Se pide determinar el óptimo técnico y el óptimo económico en este proceso productivo.

Solución:

El óptimo técnico se determina igualando la productividad marginal a cero y resolviendo la ecuación:

Luego:
$$\frac{dY}{dX} = \frac{d(45.5 + 6.0X - 1.5X^2)}{dX} = 0$$

De donde:
$$\frac{dY}{dX} = 6.0 - 3X = 0$$

$$X = 2.0 \text{ quintales de úrea / ha}$$

Reemplazando en la ecuación original el valor de X hallado, resulta:

$$Y = 51.5 \text{ quintales de maíz / ha}$$

Significa que podrá aplicarse como máximo 2 quintales/ha (92 kg/ha) de úrea con lo que se podrá obtener 51.5 quintales/ha de maíz (2,369 kg/ha).

El óptimo económico se determina igualando el precio unitario del insumo al valor de la productividad marginal:

$$3.5 = 6.2(6.0 - 3.0 X)$$

$$X = 1.996 \text{ qq/ha}$$

Luego:

$$Y = 51.499 \text{ qq/ha}$$

Se puede notar que el óptimo económico es ligeramente menor que el óptimo técnico.

Problema N°2

Suponiendo que en una investigación agroeconómica se tuvo como respuestas, en rendimiento de maíz, a los diferentes niveles de fertilización aplicados de fósforo, la siguiente función:

$$Y = 2,359.58 + 12.03502X - 0.02929X^2$$

Donde:

Y = Rendimiento de maíz Kg/ha

X = Cantidad de fósforo (P_2O_5) utilizado, Kg/ha

Esta función alcanza un nivel máximo cuando se aplica 205.45 kg de (P_2O_5) por hectárea y el valor de Y es entonces de 3,595.85 kg/ha. Estos valores se determinan igualando a cero la primera derivada de la función (condición de primer orden), o sea:

$$\frac{dY}{dX} = 0$$

Entonces:

$$\frac{dY}{dX} = \frac{d(2,359.58 + 12.03502X - 0.02929X^2)}{dX} = 0$$

$$\text{Luego: } 12.03502 - 0.05858X = 0$$

De aquí se obtiene que: **$X = 205.4$ Kg**

Reemplazando el valor de fósforo utilizado en la función de respuesta se obtiene:

$$Y = f(X) = 2,359.58 + 12.03502X - 0.02929X^2$$

$$Y = f(X) = f(205.45)$$

o sea:

$$Y_{\text{máx}} = 2,359.58 + 12.03502(205.45) - 0.02929(205.45)^2$$

$$Y_{\text{máx}} = 3,595.85 \text{ Kg/ha}$$

Sin embargo, no es el objetivo primordial del productor obtener el máximo rendimiento por hectárea por sí mismo; más bien buscar algún criterio que le permita alcanzar el mejor nivel de ingresos posible. Para lograr este objetivo, es necesario conocer también los precios del fertilizante y del

producto, para constituir una función de ingreso neto o ganancia. Si P_x es el precio del fósforo y P_y el precio del producto, la ganancia por hectárea G , estará dada por:

$$G = Y * P_y - X * P_x - C_F$$

En donde C_F representa los costos de todos los demás factores que intervienen en la producción; o sea, en este caso, los costos fijos. La ganancia se maximiza igualando a cero su derivada con respecto a X .

$$\frac{dG}{dX} = 0$$

$$\frac{dG}{dX} = \frac{d(Y * P_y - X * P_x - C_F)}{dX} = 0$$

o sea:

$$P_y * \frac{dY}{dX} - P_x = 0$$

De donde se obtiene que:

$$\frac{dY}{dX} = \frac{P_x}{P_y}$$

Esta expresión indica que la ganancia por hectárea se maximiza cuando la primera derivada de la función dY/dX , se iguala a la relación inversa de precios P_x/P_y .

Si se asume un precio de S/. 112 por Kg de P_2O_5 en el campo y un precio por kg de producto en el campo de S/. 25, reemplazando en la expresión anterior se tiene entonces que:

$$X = \frac{12.03505 - 112 / 25}{0.05858} = 128.97 \text{ (Nivel óptimo)}$$

Despejando X se tiene que:

$$12.03502 - 0.05858 X = \frac{112}{25}$$

Es decir, la cantidad de X que da la máxima ganancia por hectárea es de 128.97 Kg. mucho menor que la cantidad que daba el máximo rendimiento por hectárea (205.45 Kg.). La producción que se obtiene con este nivel de fósforo utilizado es:

$$Y = f(X) = f(128.97)$$

o sea:

$$Y = 2,359.58 = 12.03502(128.97) - 0.02929(128.97)^2$$

$Y = 3,424.55 \text{ kg/ha (nivel óptimo)}$

Si se analiza en una curva de respuesta, se puede observar aumentos considerables de rendimiento para los primeros kilogramos de fósforo aplicado, pero esta respuesta se va haciendo cada vez menos pronunciada. Por ejemplo, los primeros 50 kilogramos de fósforo aplicado causan un incremento de 525.5 Kg de producto; los siguientes 50 kilogramos sólo aumentan el rendimiento en 382.12 Kg. Al pasar la aplicación de fósforo de 128.97 Kg (nivel de máxima ganancia) a 205.45 Kg (nivel de máximo rendimiento), el rendimiento del maíz sólo aumenta en **171.3** kilogramos.

CAPÍTULO X

LA FERTILIZACIÓN Y LA PRODUCTIVIDAD DE LOS CULTIVOS

La evapotranspiración de la planta genera un movimiento de agua desde el suelo y a través de la planta. Los nutrientes son tomados del suelo y conducidos hasta las hojas de las plantas. La mayor actividad tiene lugar en las hojas verdes (tiernas) la que es llamada o conocida como la fotosíntesis. A través de este proceso fundamental, los elementos inorgánicos tomados por las plantas del aire y del suelo, gracias a la acción de la energía solar, son transformados en energía química (materia orgánica). Es decir, el dióxido de carbono (CO_2), el agua y más una cantidad de otros elementos y la energía proveniente del sol se convierten en carbohidratos que al final son los materiales básicos para la síntesis de todas las otras sustancias orgánicas producidas por las plantas. **Sin la fotosíntesis y sin el carbono no habría vida en la tierra.**

Por ello, la gran importancia de un suministro suficiente y oportuno de los nutrientes que necesita el cultivo es fundamental, para un funcionamiento correcto de todo este proceso. Es decir, si uno de los elementos nutritivos del suelo no está presente o es insuficiente, la fotosíntesis no se llevará a cabo plenamente; por lo tanto la productividad de la planta no será la óptima.

Por estas consideraciones, la fertilización debe ser la adecuada y oportuna para poder obtener los rendimientos esperados en la producción. La fertilización es una labor cultural que consiste en aplicar abonos o

fertilizantes ya sean de origen orgánico o inorgánico a la capa arable del suelo agrícola y según la profundidad radicular del cultivo a instalar. Se realiza con la finalidad de reponer o mejorar la disponibilidad de los elementos nutritivos que sean necesarios al cultivo.

Es importante tener presente que la fertilidad de un suelo es fundamental para tener un suelo productivo. Al mismo tiempo, es importante tener presente que contar con un suelo fértil no necesariamente significa que el suelo tiene que ser productivo; pues depende también de otros factores. Entre ellos, sobresale: el manejo de agua, manejo de plagas, drenaje, calidad de semillas, fertilización, entre otros.

La disponibilidad de los nutrientes en el suelo está afectada principalmente por el balance entre agua, suelo y la temperatura de éste. Mientras que el desarrollo o crecimiento radicular también depende de la temperatura del suelo, los niveles de humedad del suelo, el contenido de materia orgánica, la actividad de los microorganismos y por el contenido de aire en el suelo.

Las nutrientes se dividen en dos grandes categorías:

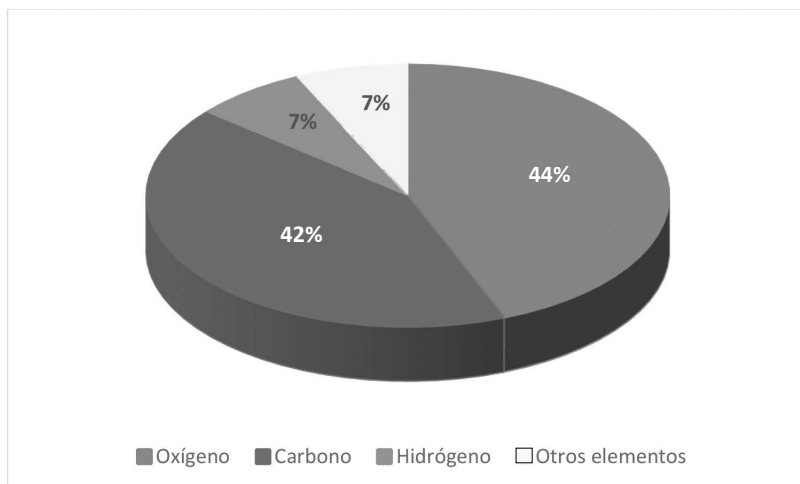
- Macronutrientes: nutrientes primarios y secundarios; y
- Micronutrientes o microelementos

Los macronutrientes se necesitan en grandes cantidades. Tienen que ser aplicados si el suelo es deficitario, según el tipo de cultivo que se instale.

Los micronutrientes o microelementos son requeridos sólo en cantidades ínfimas para el crecimiento de las plantas.

10.1 Composición básica promedio de una planta

Los elementos constitutivos promedio de una planta son:



El componente otros elementos del gráfico anterior comprende:

- Nitrógeno
- Potasio
- Fósforo
- Calcio
- Sodio
- Magnesio
- Azufre
- Silicio
- Microelementos

10.2 Elementos nutritivos esenciales para las plantas

Se consideran a 16 como los elementos esenciales para el crecimiento de las plantas; los cuales son divididos en dos grupos: Los minerales y los no minerales.

a.- Nutrientes minerales

Los siguientes elementos son derivados del suelo, de los fertilizantes que se apliquen y del abono animal y vegetal que exista o que se pueda aplicar.

a.1 Nutrientes primarios

- * Nitrógeno (N)
- * Fósforo (P)
- * Potasio (K)

a.2 Nutrientes secundarios

- * Calcio (Ca)
- * Silicio (Si)
- * Magnesio (Mg)
- * Sodio (Na)
- * Azufre (S)

a.3 Micronutrientes

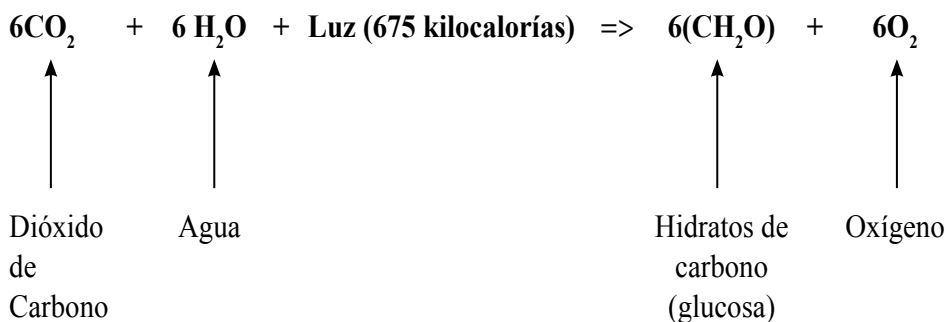
- * Boro (B)
- * Cloro (Cl)
- * Cobre (Cu)
- * Hierro (Fe)
- * Manganeseo (Mn)
- * Molibdeno (Mo)
- * Zinc (Zn)
- * Niquel (Ni)

A los nutrientes primarios y secundarios se les conoce también como los macronutrientes.

b.- Nutrientes no minerales

Se consideran dentro de este grupo a los elementos:

Carbono (C), hidrógeno (H) y Oxígeno (O): Estos elementos se encuentran en la atmósfera y en el agua y son elementos básicos que se utilizan en la fotosíntesis, de la siguiente manera:



La fotosíntesis es el proceso responsable de la mayor parte del incremento en el crecimiento de las plantas.

Una adecuada fertilidad de los suelos significa que éste debe contar tanto con los nutrientes primarios como con los secundarios y los micronutrientes, para que así las plantas puedan utilizarlos cuando los necesiten.

a) Cal agrícola

La aplicación de cal a los cultivos es importante y de gran beneficio para el logro de una buena producción.

Beneficios de la cal

- Baja la acidez del suelo
- Mejora las condiciones físicas del suelo
- Estimula la actividad microbiana del suelo
- Ayuda a que los minerales estén más disponibles para los cultivos.
- Ayuda la fijación simbiótica del N por parte de las leguminosas.
- Suministra Ca y Mg muy necesarios para las plantas.

Formas de materiales para el encalado

- Óxido de calcio (CaO), llamado también como cal viva. Cuando se agrega al suelo, reacciona de inmediato, por ello este material o el hidróxido de Calcio es ideal. Tiene una concentración de alrededor del 60.3% de Ca.
- Hidróxido de calcio (Ca (OH)_2), llamado frecuentemente cal apagada o cal hidratada.
- Cal calcítica (Ca CO_3) y Cal dolomítica ($\text{Ca Mg (CO}_3)_2$)

La cal dolomítica proporciona Calcio y Magnesio

b) Nitrógeno (N): Es el motor del crecimiento de la planta. Es conocido, también, como el constructor de proteínas; y aumenta la capacidad de absorción de los otros nutrientes por parte de la planta, debido entre otros factores:

- El N es fundamental para la síntesis de la clorofila y por lo tanto en la fotosíntesis y proteínas de la planta.
- El N se transforma en aminoácidos dentro de la planta.
- Los aminoácidos producen protoplasma que lo conducen a las células más fuertes.

- Debido a los tres puntos anteriores, se tiene una planta más vigorosa y con un sistema radicular de mayor capacidad de exploración que redundará en una mayor productividad.

El N es absorbido del suelo bajo la forma de iones de nitrato (NO_3^-) o de amonio (NH_4^+), siendo más recomendable bajo la forma de nitrato.

Síntomas de la deficiencia de N en la planta

- Un amarillamiento de las hojas (clorosis), debido a una menor cantidad de clorofila y es el síntoma más característico.
- Menor crecimiento y brotamiento de las plantas.
- En las monocotiledóneas, la clorosis comienza en la punta de las hojas; y avanza hacia la base. Cuando es severa la deficiencia de N, la gran mayoría de hojas aparecen amarillentas.

Fertilizantes nitrogenados:

Producto	%N
Amoníaco anhidro	82.0
Nitrato de amonio	33.5 – 34.0
Sulfato de amonio	21.0
Difosfato de amonio	18.0 – 21.0
Cloruro de amonio	26.0
Úrea	45.0 – 46.0
Nitrato de potasio	13.0

c) Fósforo (P)

El fósforo (P) es el elemento constituyente de la célula viva y fundamental para el crecimiento de las plantas, al mismo tiempo es uno de los tres nutrientes principales (N, P, K). La mayoría de los suelos naturales o agrícolas son deficitarios en P.

El fósforo (P) cumple un rol importante en la fotosíntesis: respiración, almacenamiento y transferencia de energía, división celular, alargamiento celular, formación temprana y el crecimiento de las raíces. Se considera, también, de vital importancia para la formación de las semillas. La

concentración de P es más alta en la semilla que en cualquier otra parte de una planta madura.

Funciones del fósforo (P)

- El fósforo (P) cumple además las siguientes funciones:
- Aumenta la eficiencia de uso del agua por la planta.
- Acelera la maduración de los cultivos.
- Aumenta la resistencia a las enfermedades en algunas plantas.
- Permite a las plantas soportar inviernos más severos.
- Ayuda a un mayor desarrollo de las plántulas y raíces de los cultivos.

Síntomas de la deficiencia de fósforo (P) en las plantas

- Coloración verde azulada de las hojas en muchas especies.
- El síntoma más saltante de la falta de P es una planta con bajo desarrollo (“enana”).
- Presenta áreas necróticas en las hojas, frutos y tallos.
- Las hojas más viejas quedan afectadas mucho antes que las hojas jóvenes.
- En las plantas de maíz, se observa un color rojizo cuando tienen deficiencia en P, ocurriendo lo mismo en otros cultivos.
- La máxima disponibilidad de P se encuentra entre los 6.0 a 7.0 de pH en el suelo.
- El N ayuda a mejorar la absorción de P y K.
- El P es vital para las primeras etapas de crecimiento de las plantas.
- El fosfato mineral mezclado con ácido sulfúrico produce una mezcla de ácido fosfórico y yeso. Por filtrado, se separa el yeso; y queda lo que se llama ácido fosfórico “verde” que contiene hasta un 54% de P_2O_5 .

d) El potasio (K)

Un nutriente vital para la planta lo constituye el potasio (K), el mismo que no puede ser reemplazado por ningún otro nutriente. Activa más de 60 enzimas (sustancias químicas que regulan la vida).

Funciones del potasio (K)

- El K es absorbido por las plantas en su forma iónica (K^+).
- Es esencial para el crecimiento de las plantas.

- El K no forma compuesto orgánico en la planta, pero si es fundamental para un adecuado metabolismo de la planta y la fotosíntesis. Cuando hay deficiencia de K, la fotosíntesis disminuye y la respiración de la planta aumenta. Estas dos situaciones generan una reducción de los carbohidratos de la planta.
- El K es esencial en la síntesis de proteínas y carbohidratos.
- El K ayuda a la planta a tener un uso más eficiente del agua, aumenta su tolerancia a la sequía, heladas y salinidad.
- El K es muy importante en la formación de frutos y en la translocación de metales como el Fe y en el balance iónico.
- El K activa encimas y controla su velocidad de reacción.
- El K mejora la calidad del fruto de los cultivos.
- El K aumenta la resistencia a enfermedades de las plantas, entre otras.

Síntomas de la deficiencia de potasio (k) en las plantas

- Manchas cloróticas seguido de manchas necróticas en la punta y los bordes de las hojas.
- Sistema radicular reducido, tallos débiles y de tamaños reducidos y fáciles al volteo.
- Los frutos y semillas son pequeños y arrugados.
- Las plantas presentan una menor resistencia a las enfermedades.

Formas comerciales del producto

Cloruro de Potasio (**KCl**) es soluble al agua, y contiene entre el 60 a 62% de **K₂O**.

Sulfato de Potasio (**K₂SO₄**), se le llama también sulfato de potasa, contiene casi el 50% de **K₂O** y el 18% de azufre.

e) El magnesio (Mg)

Es el constituyente central de la clorofila, que es el pigmento verde de las hojas que funciona como un receptor de la energía provista por el sol. Es importante en el crecimiento de la planta.

La clorosis intervenal en las hojas es uno de los síntomas más característicos de la deficiencia en este elemento.

f) El azufre (S)

Es un elemento constituyente esencial de las proteínas, y también cumple función importante en la formación de la clorofila.

Se considera relevante en el crecimiento de la planta al igual que el fósforo y el magnesio. La deficiencia de este elemento se manifiesta, entre otras, mediante una clorosis general.

g) El Calcio (Ca)

Es un elemento esencial para el crecimiento de las raíces y un constituyente del tejido celular de las membranas. También cumple función importante en la reducción de la acidez del suelo.

Síntomas de una deficiencia de Calcio

- Las regiones meristemáticas de los tallos, hojas y raíces son atacadas fuertemente, y pueden acabar muriendo, cesando el crecimiento de estos órganos.
- Las raíces pueden acortarse y ser más susceptibles a la infección de bacterias y hongos.
- En los bordes de las hojas jóvenes, aparece clorosis seguida de necrosis.
- Las puntas de las hojas adquieren la forma de gancho.

h) Los micronutrientes o micro elementos son el hierro (Fe), el manganeso (Mn), el Zinc (Zn), el cobre (Cu), el molibdeno (Mo), el cloro (Cl) y el boro (B). Estos elementos son claves en el crecimiento y producción de la planta. Por ello, son considerados como las vitaminas en la nutrición humana, y son absorbidas en cantidades muy pequeñas.

**Cuadro N°1.- Cantidad de nutrientes promedios extraídos en kg/ha
en una cosecha de varios cultivos en el Perú**

Cultivo	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Mn	Zn
Algodón**	180	27	105	30	12	2	0.06	0.11	0.32
Arroz*	150	25	120	12	9	3	0.01	1.64	0.07
Camote	45	7	62	4	9	6	0.03	0.06	0.03
Caña de azúcar	200	24	224	28	28	24	---	---	---
Cebada*	50	10	23	9	4	7	0.04	0.35	0.11
Cebolla	120	20	133	11	2	18	0.03	0.08	0.31
Frijol*)	150	16	46	7	7	4	0.04	0.05	0.04
Maíz	200	30	120	44	37	24	0.11	2.59	0.45
Maní	90	5	13	1	3	6	0.02	0.01	---
Manzana	30	5	37	8	5	10	0.03	0.03	0.03
Naranja	85	13	116	33	12	9	0.20	0.06	0.24
Papa	140	30	200	3	6	6	0.04	0.09	0.05
Tabaco, hojas	75	7	100	75	18	14	0.03	0.55	0.07
Trigo*	120	25	100	7	9	8	0.01	0.16	0.05
Tomate	120	18	130	7	11	14	0.07	0.13	0.16

* Es indicativo que se considere los granos y los rastrojos.

** Los micronutrientes corresponden sólo para semilla y fibra.

*) Las leguminosas obtienen su N en mayor proporción del aire.

Algunos fertilizantes importantes

Nombres comunes y fórmulas	Análisis en porcentaje (%)				
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Mg	S
• Fertilizantes nitrogenados					
Sulfato amónico ((NH ₄) ₂ SO ₄)	21	0	0	0	23
Nitrato amónico (NH ₄ NO ₃)	33.0–34.5	0	0	0	0
Nitrato amónico–cálcico (NH ₄ NO ₃ +CaCO ₃)	20.5–26.0 45–46	0 0	0 0	0 0	0 0
Úrea (CO(NH ₂) ₂)					
• Fertilizantes fosfatados	0	16–20	0	0	12
Superfosfato simple	0	46	0	0	0
(Ca(H ₂ PO ₄) ₂ +CaSO ₄)	0	20–40	0	0	0
Superfosfato triple o concentrado (Ca(H ₂ PO ₄) ₂)					
Roca fosfórica (fosfato mineral)	0 0	0 0	60 50	0 0	0 18
• Fertilizantes potásicos	0	0	26–30	5-7	16–22
Cloruro potásico (KCl)					
Sulfato potásico (K ₂ SO ₄)					
Sulfato potásico–magnésico (K ₂ SO ₄ *2MgSO ₄)	0	0	0	0	16–18
• Fertilizante Azufrado	0	0	0	16	22
Yeso (CaSO ₄ .2 H ₂ O)	0	0	0	20	27
• Fertilizante de Magnesio					
Kieserita (MgSO ₄ *7H ₂ O)					
Kieserita calcinada (MgSO ₄ *H ₂ O)	0 0	0 0	0 0	16 20	22 27

Algunos fertilizantes con micronutrientes importantes

Producto	Fórmula	Micronutrientes
Sulfato Ferroso	FeSO ₄ *7H ₂ O	Hierro (Fe)
Sulfato de Cobre	Cuso ₄ *5H ₂ O	Cobre (Cu)
Sulfato de Zinc	ZnSO ₄ *7H ₂	Zinc (Zn)
Sulfato de Manganeseo	MnSO ₄ *7H ₂ O	Manganeseo (Mn)
Bórax	Na ₂ B ₄ O ₇ *10H ₂ O	Boro (B)
Molibdato de Sodio	Na ₂ MoO ₄ *10H ₂ O	Molibdeno (Mo)

Factores de conversión usados en fertilización

Unidad	Equivalencia
Área y distancia	
1 hectárea	= 10,000 metros cuadrados = 2.471 acres
1 metro	= 1.0936 yardas = 3.2808 pies = 39.37 pulgadas
1 acre	= 4.480 yardas cuadradas = 0.4047 hectáreas
1 yarda	= 3 pies = 0.9144 metros
1 pie	= 12 pulgadas = 0.3048 metros
Peso	
1 kilogramo	= 1,000 gramos = 2.2046 libras
1 kg/ha	= 0.8922 lb/acre
1 tonelada métrica	= 2.204.6 libras = 1.1023 toneladas cortas = 0.9842 tonelada larga
1 libra(lb)	= 0.4536 kilogramos
1 libra/acre	= 1.1208 kg/ha
1 tonelada corta	= 2,000 libras = 0.9072 tonelada métrica
1 tonelada larga	= 2,240 libras = 1.016 tonelada métrica
Presión	
1 atmosfera	= 10.00 m.c.a (m de columna de agua)
1 bar	= 9.88 m.c.a
1 PSI o lb/pulg ²	= 0.70 m.c.a
1 kg/cm ²	= 10.00 m.c.a
Fertilizantes	
Fósforo	
Cambiar de P ₂ O ₅ (Fosfato) a P	Multiplicando P ₂ O ₅ por 0.4364
Cambiar de P a P ₂ O ₅	Multiplicando P por 2.2914
Potasio	
Cambiar de K ₂ O (potasa) a K	Multiplicando K ₂ O por 0.8302
Cambiar de K a K ₂ O	Multiplicando K por 1.2046

10.3. Problemas de fertilización

Problema N° 1

Se requiere obtener una mezcla de 1 tonelada de fertilizante compuesto de fórmula: 80–30–20, sobre la base de los siguientes fertilizantes disponibles en el mercado:

Nitrato de amonio: 33% de N

Superfosfato triple: 45% de P_2O_5

Cloruro de potasio: 60% de K_2O

¿Qué cantidad de fertilizante de cada uno de ellos se tendrá que requerir?

Solución:

$$a) \frac{\% \text{ de N de la fórmula a usar}}{\% \text{ de N en el fertilizante a comprar}} = \frac{80}{33} = 2.4242$$

$$b) \frac{\% \text{ de P de la fórmula a usar}}{\% \text{ de P en el fertilizante a comprar}} = \frac{30}{45} = 0.667$$

$$c) \frac{\% \text{ de K de la fórmula a usar}}{\% \text{ de K en el fertilizante a comprar}} = \frac{20}{60} = 0.333$$

Como la mezcla total a usar en el cultivo es de 1,000 kg, luego la cantidad de cada fertilizante a usar en la mezcla total se calculará:

$$\begin{array}{ccccc} \text{Cantidad de fertilizante} & + & \text{cantidad de} & + & \text{cantidad de fertilizante} = \\ & & \text{fertilizante} & & 1,000 \text{ kg (1 tonelada)} \\ & \uparrow & \uparrow & \uparrow & \\ & \text{nitrogenado} & \text{fosforado} & \text{potásico} & \end{array}$$

La ecuación se formará:

$$2.4242X + 0.667X + 0.33X = 1000$$

$X = 292.04$ (este valor será el factor de proporcionalidad)

Luego, se requerirá comprar:

Nitrato de amonio = $(292.04) * (2.4242) = 707.96 \text{ kg}$

Superfosfato triple = $(292.04) * (0.667) = 194.79 \text{ kg}$

Cloruro de potasio = $(292.04) * (0.333) = 97.25 \text{ kg}$

Mezclando estas cantidades de fertilizantes se tendrá una mezcla de 1,000 kg, y se cumplirá con la fórmula de fertilización a usar: 80 – 30 – 20

Problema N°2

¿Cuántas bolsas de 50 kg de peso de sulfato amónico, que tiene 21% de N y 24% de S, serán necesarias para poder aplicar 60 kg/ha de N?

Solución:

1 bolsa de sulfato amónico pesa 50 kg.

Luego, si en una bolsa de 50 kg, el 21% es Nitrógeno, entonces, en esa bolsa el peso del N será:

$$N = 50 \left(\frac{21}{100} \right) = 10.5 \text{ kg}$$

Luego, como se debe aplicar 60 kg/ha de N; entonces será necesario aplicar:

1 bolsa de 50 kg de sulfato amónico $\longrightarrow$ 10.5 kg N/bolsa

X $\longrightarrow$ 60 kg N/ha

Entonces: $X = \frac{60(50)}{10.5} = 285 \text{ kg de fertilizante} = \frac{5.7 \text{ bolsa}}{\text{ha}}$

Rpta: Se tendrá que comprar 6 bolsas de sulfato amónico, dado que no se podrá conseguir 5.7 bolsas en la tienda.

Si la parcela sólo tuviese un área de $\frac{1}{2}$ ha, la cual equivale a 5,000 m²; y si se quisiera aplicar la misma dosis de N, entonces sólo se requerirá:

10,000m² (1ha) $\longrightarrow$ 5.7 bolsas de fertilizantes

5,000m² (1/2ha) $\longrightarrow$ X

$$X = \frac{5,000(5.7 \text{ bolsas})}{10,000} = 2.85 \text{ bolsas}$$

Esto significa que se tendría que comprar 3 bolsas de sulfato amónico.

Problema N°3

Si se quiere aplicar en la fertilización la dosis de 45–45–45, la decisión más fácil para el agricultor es comprar un fertilizante multinutriente de contenido en %: 15–15–15, que existe en el mercado.

¿Cuántas bolsas de 50 kg se tendrá que comprar para aplicar la dosis requerida?

Solución

En una bolsa de 50 kg de multinutriente se tendrá:

$$N: (50 \text{ kg}) \cdot (15\%) = 7.5 \text{ kg}$$

$$P: (50 \text{ kg}) \cdot (15\%) = 7.5 \text{ kg}$$

$$K: (50 \text{ kg}) \cdot (15\%) = 7.5 \text{ kg}$$

Conociendo esto se puede realizar la siguiente regla de tres:

En 1 bolsa de 50 kg de multinutriente se tendrá 7.5 kg de N, 7.5 kg de P y 7.5 kg de K

X 45 kg de N, 45 kg de P, 45 kg de K

$$X = \frac{45(50)}{7.5} = 300 \text{ kg de multinutriente}$$

$$X = \frac{300\text{kg}}{50\text{kg/bolsa}} = 6 \text{ bolsas de multinutriente}$$

$$X = 6 \text{ bolsas}$$

Rpta:

Se tendrá que comprar 6 bolsas de multinutriente, con lo cual se aplicará la dosis de fertilización: 45–45–45.

Problema N°4

Si se requiere aplicar una dosis de fertilización de 90–30–30 para lo cual se cuenta en el mercado con bolsas de fertilizante de fórmula: 15–15–15 y bolsas de urea. ¿Qué productos recomendaría aplicar y cuánto de cada uno de ellos?

Solución:

Como las dosis de N, P y K son diferentes, aquí se procederá de una manera siguiente. En primer lugar, sabemos que en una bolsa de 50 kg de multinutriente se tendrá:

$$\text{N: } (50 \text{ kg}) \cdot (15\%) = 7.5 \text{ kg}$$

$$\text{P: } (50 \text{ kg}) \cdot (15\%) = 7.5 \text{ kg}$$

$$\text{K: } (50 \text{ kg}) \cdot (15\%) = 7.5 \text{ kg}$$

Conociendo esto, se puede realizar la siguiente regla de tres:

En 50 kg de multinutriente.....7.5 kg de N, 7.5 kg de P, y 7.5 kg de K

X.....30 kg de N, 30 kg de P, 30 kg de K

$$X = \frac{30(50)}{7.5} = 200 \text{ kg de multinutriente}$$

$$\text{Nº bolsas de multinutriente} = \frac{200 \text{ kg}}{\frac{50 \text{ kg}}{\text{bolsa}}} = 4 \text{ bolsas}$$

$$X = 4 \text{ bolsas de multinutrientes}$$

Con estas 4 bolsas se cubrirá al mismo tiempo las necesidades de P y K de la dosis requerida (30 kg/ha) de cada uno de ellos; pero como con esta dosis se aplica sólo 30 kg de N, entonces para cubrir la dosis requerida (90kg) se tendrá que aplicar la diferencia: $90 - 30 = 60$ kg de N, usando úrea. Para ello, se calcula el número de bolsas de úrea necesarias. Sabemos que 1 saco de úrea contiene 46% de N, por lo tanto se puede afirmar:

$$\text{N: } (50 \text{ kg}) \cdot (46\%) = 23 \text{ kg}$$

Conociendo esto, se puede realizar la siguiente regla de tres:

1 saco de úrea (50kg)..... 23 kg deN

X 60 kg de N

$$X = \frac{130 \text{ kg}}{50 \text{ kg/bolsa}} = 2.61 \text{ bolsas de úrea}$$

Rpta:

Se recomienda aplicar:

- 4 bolsas de multifertilizantes y
- 2.61 bolsas de urea $\cong$ 3 bolsas

Problema N° 5

Si se desea aplicar una dosis de fertilización de 90–45–60, qué cantidad de productos existentes en el mercado se deben comprar.

Solución:

Para ello, decidimos preparar una mezcla sobre la base de los productos: úrea, superfosfato triple o fosfato diamónico y cloruro potásico; conociendo que:

- Úrea contiene: 46%N
- Superfosfato triple contiene: 46% de P_2O_5
- Fosfato diamónico contiene: 18% N y 46% de P_2O_5
- Cloruro potásico contiene: 60% de K_2O

Calculando la cantidad de los productos a comprar; si se tiene que aplicar: N=90 kg; P=45 kg y K=60 kg

- a) **Sabemos que la “úrea”** contiene 46% de nitrógeno, entonces podemos hacer la siguiente regla de tres para saber qué cantidad de úrea necesitaremos para completar la necesidad de 90 kg de nitrógeno para 1 hectárea:

100 kg de úrea ----- 46 kg de N

X ----- 90 kg de N

$$\text{Úrea} = \frac{(90 \text{ kg de N}) * (100 \text{ kg de úrea})}{46 \text{ kg de N}} = 195.65 \text{ kg de úrea}$$

Por lo tanto, se requerirán 195.65 kg de úrea para 1 hectárea de terreno y de esa forma obtendremos los 90 kg de N que necesitamos.

- b) **Sabemos que el “superfosfato triple”** contiene 46% de P_2O_5 entonces podemos hacer la siguiente regla de tres para saber qué cantidad de “superfosfato triple” necesitaremos para completar la necesidad de 45 kg de fósforo para 1 hectárea:

100 kg de superfosfato triple ----- 46 kg de P_2O_5

X ----- 45 kg de P_2O_5

$$\text{superfosfato triple} = \frac{(45 \text{ kg de } P_2O_5) * (100 \text{ kg de superfosfato triple})}{46 \text{ kg de } P_2O_5} = 97.83 \text{ kg de superfosfato triple}$$

Por lo tanto, se requerirán 97.83 kg de superfosfato triple para 1 hectárea de terreno. De esa forma, obtendremos los 45 kg de P_2O_5 que necesitamos.

- c) **Sabemos que el “cloruro potásico”** contiene 60% de K_2O , entonces podemos hacer la siguiente regla de tres para saber qué cantidad de “cloruro potásico” necesitaremos para completar la necesidad de 60 kg de K para 1 hectárea:

100 kg de cloruro potásico ----- 60 kg de K_2O

X ----- 60 kg de K_2O

$$\text{cloruro potásico} = \frac{(60 \text{ kg de } K_2O) * (100 \text{ kg de cloruro potásico})}{60 \text{ kg de } K_2O} = 100 \text{ kg de cloruro potásico}$$

Por lo tanto, se requerirán 100 kg de cloruro potásico para 1 hectárea de terreno y de esa forma obtendremos los 60 kg de K_2O que necesitamos.

- d) **Sabemos que el “fosfato diamónico”** contiene 46% de P_2O_5 , entonces podemos hacer la siguiente regla de tres para saber qué cantidad de “fosfato diamónico” necesitaremos para completar la necesidad de 45 kg de P para 1 hectárea:

100 kg de fosfato diamónico ----- 46 kg de P_2O_5

X ----- 45 kg de P_2O_5

$$\text{fosfato diamónico} = \frac{(45 \text{ kg de } P_2O_5) * (100 \text{ kg de fosfato diamónico})}{46 \text{ kg de } P_2O_5} = 97.83 \text{ kg de fosfato diamónico}$$

Asimismo, sabemos que el 18% del contenido de fosfato diamónico contiene N:

$$(97.83 \text{ kg/ha}) \cdot (0.18) = 17.61 \text{ kg de N}$$

Sobre la base de estos resultados y de los costos de cada uno de los productos en el mercado se tomará la decisión más adecuada, es decir se comprará: Úrea, superfosfato triple y cloruro potásico. Aquí es preciso remarcar que hay algunos productos que no son compatibles ni química ni físicamente con otros.

Rpta:

$$\begin{aligned} \text{Úrea} &= \left(195.65 \frac{\text{kg}}{\text{ha}}\right) \cdot \left(\frac{1 \text{ bolsa}}{50 \text{ kg}}\right) = 3.91 \frac{\text{bolsas}}{\text{ha}} \cong 4 \text{ bolsas/ha} \\ \text{Superfosfato triple} &= \left(97.83 \frac{\text{kg}}{\text{ha}}\right) \cdot \left(\frac{1 \text{ bolsa}}{50 \text{ kg}}\right) = 1.96 \frac{\text{bolsas}}{\text{ha}} \cong 2 \text{ bolsas/ha} \\ \text{Cloruro potásico} &= \left(100 \frac{\text{kg}}{\text{ha}}\right) \cdot \left(\frac{1 \text{ bolsa}}{50 \text{ kg}}\right) = 2 \text{ bolsas/ha} \end{aligned}$$

Si se optase por el “fosfato diamónico” en vez de utilizar “superfosfato triple”, se tendría el número de bolsas de cada producto; ya que el “fosfato diamónico”, además de P_2O_5 , también contiene nitrógeno; por lo tanto sería necesaria utilizar menor cantidad de úrea con tal de completar el requerimiento de fertilizante.

Problema N°6:

Se está planificando la siembra de camote y según los especialistas la dosis recomendada de fertilización para la zona es de: 150–80–70 ¿cuántos sacos de úrea de 46% de N, superfos–24 que tiene un 24% de P_2O_5 y cloruro de potasio que tiene 60% de K_2O se tendrán que comprar para abonar 1 ha?

Solución:

De acuerdo a la dosis recomendada de 150–80–70, podemos concluir que para una hectárea necesitamos 150 kg de N, 80 kg de P_2O_5 y 70 kg de K_2O . Conociendo esto, procedemos a desarrollar este problema:

- a) **Sabemos que la “úrea”** contiene 46% de nitrógeno, entonces podemos hacer la siguiente regla de tres para saber qué cantidad de úrea se requerirá para completar la necesidad de 150 kg de N para 1 hectárea:

100 kg de úrea ----- 46 kg de N

X----- 150 kg de N

$$\text{Úrea} = \frac{(150 \text{ kg de N}) * (100 \text{ kg de úrea})}{46 \text{ kg de N}} = 326.09 \text{ kg de úrea}$$

Por lo tanto, se necesitarán 326.09 kg de úrea para 1 hectárea de terreno, de esa forma obtendremos los 150 kg de N que necesitamos. Como la compra se hace en sacos de 50 kg cada uno, entonces:

$$\text{Úrea} = \left(326.09 \frac{\text{kg}}{\text{ha}} \right) * \left(\frac{1 \text{ bolsa}}{50 \text{ kg}} \right) = 6.52 \frac{\text{bolsas}}{\text{ha}} \cong 7 \text{ bolsas/ha}$$

De acuerdo a este cálculo, se necesitará comprar 6.52 sacos; por lo tanto se recomendará comprar 7 sacos de úrea para cubrir las necesidades de N para 1 hectárea.

- b) **Sabemos que el “superfos-24”** contiene 24% de P_2O_5 , entonces podemos hacer la siguiente regla de tres para saber qué cantidad de “superfos-24” necesitaremos para completar la necesidad de 80 kg de fósforo para 1 hectárea:

100 kg de superfos-24 ----- 24 kg de P_2O_5

X ----- 80 kg de P_2O_5

$$\text{superfos} - 24 = \frac{(80 \text{ kg de } \text{P}_2\text{O}_5) * (100 \text{ kg de superfos} - 24)}{24 \text{ kg de } \text{P}_2\text{O}_5} = 333.3 \text{ kg de superfos} - 24$$

Por lo tanto, se requerirán 333.3 kg de “superfos-24” para 1 hectárea de terreno y de esa forma obtendremos los 80 kg de P_2O_5 que

necesitamos. Como la compra se hace en sacos de 50 kg cada uno, entonces:

$$\text{Superfos} - 24 = \left(333.33 \frac{\text{kg}}{\text{ha}} \right) * \left(\frac{1 \text{ bolsa}}{50 \text{ kg}} \right) = 6.67 \frac{\text{bolsas}}{\text{ha}} \cong 7 \text{ bolsas/ha}$$

De acuerdo a este cálculo, se necesitará comprar 6.67 sacos; por lo tanto se recomendará comprar 7 sacos de úrea para cubrir las necesidades de P_2O_5 para 1 hectárea.

- c) **Sabemos que el “cloruro de potasio”** contiene 60% de K_2O entonces podemos hacer la siguiente regla de tres para saber qué cantidad de “cloruro de potasio” necesitaremos para completar la necesidad de 70 kg de K_2O para 1 hectárea:

100 kg de cloruro de potasio ----- 60 kg de K_2O

X ----- 70 kg de K_2O

$$\text{cloruro de potasio} = \frac{(70 \text{ kg de } \text{K}_2\text{O}) * (100 \text{ kg de cloruro de potasio})}{60 \text{ kg de } \text{K}_2\text{O}} = 116.67 \text{ kg de cloruro de potasio}$$

Por lo tanto, se requerirán 116.67 kg de “cloruro de potasio” para 1 hectárea de terreno, de esa forma obtendremos los 70 kg de K_2O que necesitamos. Como la compra se hace en sacos de 50 kg cada uno, entonces:

$$\text{cloruro de potasio} = \left(116.67 \frac{\text{kg}}{\text{ha}} \right) * \left(\frac{1 \text{ bolsa}}{50 \text{ kg}} \right) = 2.33 \frac{\text{bolsas}}{\text{ha}} \cong 3 \text{ bolsas/ha}$$

De acuerdo a este cálculo se necesitará comprar 2.33 sacos; por lo tanto se recomendará comprar 3 sacos de “cloruro de potasio” para cubrir las necesidades mínimas de K_2O para 1 hectárea.

Rpta:

Se comprarán 7 sacos de úrea, 7 sacos de superfos-24 y 3 sacos de cloruro de potasio.

Problema N°7:

Se está calculando los costos de producción de 2.8 has de maíz, para lo cual se requiere calcular las necesidades de fertilización, si se conoce que para la zona la dosis de fertilización más adecuada es: 160–80–100. Los fertilizantes que se comercializan en la zona son: úrea (46% N), fosfato diamónico (46% P_2O_5 y 18% N) y sulfato de potasio (50% K_2O). Calcular el número de bolsas de cada producto que se tendrán que comprar.

Solución:

De acuerdo a la dosis recomendada de 160–80–100, podemos concluir que para una hectárea necesitamos 160 kg de N, 80 kg de P_2O_5 y 100 kg de K_2O . Además, se puede ver que el fosfato diamónico contiene tanto P_2O_5 como N; por lo tanto primero calcularemos las necesidades del fósforo que cubriría el fosfato diamónico, y una vez cubierta esta necesidad de fósforo calcularemos cuánto de nitrógeno aporta para que la diferencia de nitrógeno que no se pueda cubrir con este fertilizante sea cubierta por la úrea.

- a) Sabemos que el “fosfato diamónico” contiene 46% de P_2O_5 y 18% de N, entonces podemos hacer la siguiente regla de tres para saber qué cantidad de “fosfato diamónico” necesitaremos para completar la necesidad de 80 kg de fósforo para 1 hectárea:

100 kg de fosfato diamónico ----- 46 kg de P_2O_5

X ----- 80 kg de P_2O_5

$$\text{fosfato diamónico} = \frac{(80 \text{ kg de } P_2O_5) * (100 \text{ kg de fosfato diamónico})}{46 \text{ kg de } P_2O_5} = 173.91 \text{ kg de fosfato diamónico}$$

Por lo tanto, se requerirán 173.91 kg de “fosfato diamónico” para 1 hectárea de terreno, de esa forma obtendremos los 80 kg de P_2O_5 que necesitamos. Se necesita aplicar un total de 2.8 hectáreas, por lo tanto necesitamos un total de 486.95 kg de este nutriente. Como la compra se hace en sacos de 50 kg cada uno, entonces:

$$\text{fosfato diamónico} = (486.95 \text{ kg}) * \left(\frac{1 \text{ bolsa}}{50 \text{ kg}} \right) = 9.73 \text{ bolsas} \cong 10 \text{ bolsas}$$

De acuerdo a este cálculo, se necesitará comprar 9.73 sacos; por lo tanto se recomendará adquirir 10 sacos de fosfato diamónico para cubrir las necesidades de P_2O_5 para 2.8 hectáreas.

Al aplicar 10 sacos de fosfato diamónico en 2.8 hectáreas, no solo se estará aplicando el fósforo requerido, sino también se estará aplicando nitrógeno. Cada saco de fosfato diamónico contiene 50 kg, por lo tanto en 10 sacos habrá un total de 500 kg de fosfato diamónico. Además, sabemos que el fosfato diamónico contiene 18% de N; por lo tanto al aplicar fosfato diamónico estaremos aplicando también $(500 \text{ kg}) * (0.18) = 90 \text{ kg}$ de Nitrógeno.

- b) Nos piden completar la formulación de 160–80–100**, por lo tanto necesitamos cubrir la necesidad de 160 kg de nitrógeno por hectárea. En este caso necesitamos cubrir esta necesidad pero para 2.8 hectáreas, por lo tanto en realidad necesitamos $(160 \text{ kg}) * (2.8 \text{ has}) = 448 \text{ kg}$ de nitrógeno. Se ha calculado que el fosfato diamónico para un total de 90 kg de nitrógeno, por lo tanto la urea deberá aportar la diferencia $448 \text{ kg} - 90 \text{ kg} = 358 \text{ kg}$. Sabemos que la “urea” contiene 46% de nitrógeno, entonces podemos hacer la siguiente regla de tres para saber qué cantidad de urea se requerirá para completar la necesidad de 358 kg de N para 2.8 hectáreas:

100 kg de urea ----- 46 kg de N

X ----- 358 kg de N

$$\text{Úrea} = \frac{(358 \text{ kg de N}) * (100 \text{ kg de urea})}{46 \text{ kg de N}} = 778.26 \text{ kg de urea}$$

Por lo tanto, se requerirán 778.26 kg de urea para 2.8 hectáreas de terreno y de esa forma obtendremos los 150 kg de N que necesitamos. Como la compra se hace en sacos de 50 kg cada uno, entonces:

$$\text{Úrea} = (778.26 \text{ kg}) * \left(\frac{1 \text{ bolsa}}{50 \text{ kg}} \right) = 15.57 \text{ bolsas} \cong 16 \text{ bolsas}$$

De acuerdo a este cálculo se necesitará comprar 15.57 sacos; por lo tanto se recomendará adquirir 16 sacos de úrea para cubrir las necesidades de N para 2.8 hectáreas.

- c) **Sabemos que el “sulfato de potasio”** contiene 50% de K_2O . También, que de acuerdo al requerimiento de nutrientes de 160–80–100, podemos concluir que para una hectárea necesitamos 100 kg de K_2O . En este caso, se desean fertilizar 2.8 hectáreas; por lo tanto necesitaremos un total de 280 kg de K_2O . Realizando la regla de tres, tenemos lo siguiente:

100 kg de sulfato de potasio ----- 50 kg de K_2O

X ----- 280 kg de K_2O

$$\text{sulfato de potasio} = \frac{(280 \text{ kg de } K_2O) * (100 \text{ kg de sulfato de potasio})}{50 \text{ kg de } K_2O} = 560 \text{ kg de sulfato de potasio}$$

Por lo tanto, se requerirán 560 kg de “sulfato de potasio” para 2.8 hectáreas de terreno y de esa forma obtendremos los 280 kg de K_2O que necesitamos para esta área mencionada. Como la compra se hace en sacos de 50 kg cada uno, entonces:

$$\text{cloruro de potasio} = (560 \text{ kg}) * \left(\frac{1 \text{ bolsa}}{50 \text{ kg}} \right) = 11.2 \text{ bolsas} \cong 12 \text{ bolsas}$$

De acuerdo a este cálculo, se necesitará comprar 11.2 sacos; por lo tanto se recomendará comprar 12 sacos de “sulfato de potasio” para cubrir las necesidades mínimas de K_2O para 2.8 hectáreas.

Finalmente, para cubrir las necesidades de N-P-K para 2.8 hectáreas se tendrá que comprar:

Rpta:	Fosfato diamónico	:486.95 kg	≅ 9.73 bolsas	→ 10 bolsas
	Úrea	: 778.26 kg	≅ 15.57 bolsas	→ 16 bolsas
	Sulfato de Potasio	: 560 kg	≅ 11.2 bolsas	→ 12 bolsas

Problema N° 8:

En la provincia de Chota (Cajamarca), un agricultor siembra 1 ha de papa y su abonamiento lo realiza de la siguiente manera: 2 sacos de úrea, 6 sacos de fosfato diamónico, 3 sacos de cloruro de potasio (KCl) y adicionalmente le aplica a su cultivo 3,000 kg de estiércol de gallina (gallinaza). El responsable del fundo indica que con estas cantidades se está aplicando la dosis de 120–160–120. Determinar el % de N, P_2O_5 y K_2O que contiene o aporta la gallinaza.

Solución:

Se aplica:

- 2 sacos de úrea = 100 kg de úrea
- 6 sacos de fosfato diamónico = 300 kg de fosfato diamónico
- 3 sacos de KCl = 150 kg de KCl.

a) Sabemos que la “úrea” contiene 46% de nitrógeno; por lo tanto se puede decir que en 100 kg de úrea se encuentran 46 kg de nitrógeno. Debido a que el agricultor en este caso aplica 100 kg de úrea a 1 hectárea de papa, entonces podemos afirmar que la cantidad de nitrógeno que estos 100 kg de úrea aporta es de 46 kg de nitrógeno.

b) Sabemos que el “fosfato diamónico” contiene 46% de P_2O_5 y 18% de N entonces:

b.1) Podemos hacer la siguiente regla de tres para saber que cantidad de P_2O_5 se ha aplicado con los 300 kg de “fosfato diamónico”:

100 kg de fosfato diamónico ----- 46 kg de P_2O_5

300 kg de fosfato diamónico ----- X

$$X = \frac{(46 \text{ kg de } P_2O_5) * (300 \text{ kg de fosfato diamónico})}{100 \text{ kg de fosfato diamónico}} = 138 \text{ kg de } P_2O_5$$

- b.2)** Para saber qué cantidad de nitrógeno se aplica al suelo con los 300 kg de fosfato diamónico, se puede hacer una regla de tres o se puede sacar el 18% a los 300 kg de fosfato diamónico. Ambas formas nos darán el mismo resultado:

100 kg de fosfato diamónico ----- 18 kg de N

300 kg de fosfato diamónico ----- X

$$X = \frac{(18 \text{ kg de N}) * (300 \text{ kg de fosfato diamónico})}{100 \text{ kg de fosfato diamónico}} = 54 \text{ kg de N}$$

Podemos concluir que con los 300 kg de fosfato diamónico estamos aplicando 138 kg de P_2O_5 y 54 kg de N.

- c)** Sabemos que el “cloruro de potasio” contiene 60% de K_2O ; si se está aplicando 150 kg de cloruro de potasio, por lo tanto realizando la regla de tres tenemos lo siguiente:

100 kg de cloruro de potasio ----- 60 kg de K_2O

150 kg de cloruro de potasio ----- X

$$X = \frac{(60 \text{ kg de } K_2O) * (150 \text{ kg de cloruro de potasio})}{100 \text{ kg de cloruro de potasio}} = 90 \text{ kg de } K_2O$$

Podemos concluir que con los 150 kg de cloruro de potasio estamos aplicando 90 kg de K_2O .

Entonces el total de nutrientes aportados por los fertilizantes en 1 hectárea será:

- $N = 46 \text{ Kg} + 54 \text{ Kg} = 100 \text{ Kg}$
- $P_2O_5 = 138 \text{ Kg}$
- $K_2O = 90 \text{ Kg}$

La dosis recomendada es 120 – 160 – 120, por lo tanto sabemos que en 1 hectárea se debe llegar a 120 kg de N, 160 kg de P_2O_5 y 120 kg K_2O ; por lo tanto se puede concluir que faltará adicionar:

$$\begin{array}{ll} \text{N} & : \quad 120 \text{ kg} - 100 \text{ kg} = 20 \text{ Kg} \\ P_2O_5 & : \quad 160 \text{ kg} - 138 \text{ kg} = 22 \text{ Kg} \\ K_2O & : \quad 120 \text{ kg} - 90 \text{ kg} = 30 \text{ Kg} \end{array}$$

Es decir, según el problema estas cantidades estarán contenidas en los 3,000 kg de gallinaza que se aplicará, que expresadas en %, serán:

Rpta:

$$\text{N} : (20/3,000) * 100 = 0.67\% \text{ N}$$

$$P_2O_5 : (22/3,000) * 100 = 0.73\% P_2O_5$$

$$K_2O : (30/3,000) * 100 = 1.0\% K_2O$$

Problema N° 9:

Si se conoce que los contenidos de nutrientes del suelo son:

$$Mg^{2+} = 0.60 \text{ me}/100 \text{ gr}$$

$$K^+ = 0.50 \text{ me}/100 \text{ gr}$$

$$Ca^{2+} = 3.50 \text{ me}/100 \text{ gr}$$

$$Na^+ = 0.25 \text{ me}/100 \text{ gr}$$

$$Al^{3+} = 3.50 \text{ me}/100 \text{ gr}$$

$$H^+ = 0.92 \text{ me}/100 \text{ gr}$$

Determinar las equivalencias de esta información expresadas en kg/ha; si se sabe además que la profundidad de suelo analizada es 30 cm y la textura es franco arenosa cuya $d_{ap} = 1.42 \text{ gr}/\text{cm}^3$.

Solución:

En primer lugar, se calculará cuántas toneladas de suelo hay en 1 hectárea, y para eso primero calculamos qué volumen hay en 1 ha de suelo y a una profundidad de 30 cm de suelo. En 1 hectárea, habrá el siguiente volumen:

$$\text{Volumen de suelo} = (30 \text{ cm}) * (1 \text{ ha})$$

$$\text{Volumen de suelo} = (30 \text{ cm}) * (10,000 \text{ m}^2)$$

$$\text{Volumen de suelo} = (30 \text{ cm}) * (10,000 \text{ m}^2) \left(\frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}} \right)^2$$

$$\text{Volumen de suelo} = (30 \text{ cm}) * (10,000 \text{ m}^2) \left(\frac{10,000 \text{ cm}^2}{1 \text{ m}^2} \right)$$

$$\text{Volumen de suelo} = 3,000,000,000 \text{ cm}^3$$

Ahora, calculemos cuantas toneladas de suelo hay en 1 hectárea de terreno y a una profundidad de 30 cm de suelo:

$$\text{Peso de suelo} = (d_{ap}) * \text{volumen}$$

$$\text{Peso de suelo} = \left(1.42 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right) * 3,000,000,000 \text{ cm}^3$$

$$\text{Peso de suelo} = 4,260,000,000 \text{ gr}$$

$$\text{Peso de suelo} = (4,260,000,000 \text{ gr}) * \left(\frac{1 \text{ kg}}{1,000 \text{ gr}} \right) * \left(\frac{1 \text{ tonelada}}{1,000 \text{ kg}} \right)$$

$$\text{Peso de suelo} = 4,260 \text{ toneladas}$$

Para transformar de miliequivalentes a miligramos, utilizamos la siguiente ecuación:

$$\frac{\text{mg}}{\text{peso atómico}} * \text{valencia} = \text{me}$$

Reformulando esta ecuación, tendríamos:

$$\text{mg} = \text{me} * \frac{\text{peso atómico}}{\text{valencia}}$$

a) Magnesio (Mg^{2+})

Tenemos la información:

$$Mg^{2+} = 0.60 \text{ me}/100 \text{ gr}$$

Sabemos:

peso atómico = 24

valencia = 2

Ahora calcularemos cuántos miligramos de Mg^{2+} hay en 100 gr de suelo:

$$mg = me * \frac{\text{peso atómico}}{\text{valencia}}$$

$$mg = 0.6 * \frac{24}{2}$$

$$mg = 7.2$$

$$7.2 \text{ mg} = 0.0072 \text{ gr}$$

Por lo tanto, podemos decir que en 100 gr de suelo hay 0.0072 gr Mg^{2+} . Sabemos que en 1 hectárea de suelo a una profundidad de 30 cm hay un total de 4,260 toneladas (4,260,000 kg) de suelo, por lo tanto podemos hacer la siguiente regla de tres:

Mg^{2+} suelo

0.0072 kg..... 100 kg

$$X..... 4,260,000 \text{ kg} \Rightarrow \therefore X = 306.72 \text{ kg } Mg^{2+}/ha$$

b) Potasio (K^+)

Tenemos la información:

$$K^+ = 0.50 \text{ me}/100 \text{ gr}$$

Sabemos:

peso atómico = 39

valencia = 1

Ahora calcularemos cuántos miligramos de K^{2+} hay en 100 gr de suelo:

$$mg = me * \frac{\text{peso atómico}}{\text{valencia}}$$

$$mg = 0.5 * \frac{39}{1}$$

$$mg = 19.5$$

$$19.5 \text{ mg} = 0.0195 \text{ gr}$$

Por lo tanto, podemos decir que en 100 gr de suelo hay 0.0195 gr K^+ . Sabemos que en 1 hectárea de suelo a una profundidad de 30 cm hay un total de 4,260 toneladas (4,260,000 kg) de suelo, por lo tanto podemos hacer la siguiente regla de tres:

K^+	suelo
-------	-------

0.0195 kg	100 kg
-----------------	--------

X.....	4,260,000 kg	=> $\therefore X = 830 \text{ kg } K^+ /ha$
--------	--------------	---

c) Calcio (Ca^{2+})

Tenemos la información:

$$Ca^{2+} = 3.50 \text{ me}/100 \text{ gr}$$

Sabemos:

peso atómico = 40

valencia = 2

Ahora calcularemos cuántos miligramos de Ca^{2+} hay en 100 gr de suelo:

$$mg = me * \frac{\text{peso atómico}}{\text{valencia}}$$

$$mg = 3.5 * \frac{40}{2}$$

$$mg = 70$$

$$70 \text{ mg} = 0.07 \text{ gr}$$

Por lo tanto, podemos decir que en 100 gr de suelo hay 0.07 gr Ca^{2+} . Sabemos que en 1 hectárea de suelo a una profundidad de 30 cm hay un total de 4,260 toneladas (4,260,000 kg) de suelo, por lo tanto podemos hacer la siguiente regla de tres:

Ca^{2+}	suelo	
0.07 kg.....	100 kg	
X	4,260,000 kg	=> $\therefore X = 2,982 \text{ kg } \text{Ca}^{2+} / \text{ha}$

d) Sodio (Na^+)

Tenemos la información: $\text{Na}^+ = 0.25 \text{ me}/100 \text{ gr}$

Sabemos:

peso atómico = 23

valencia = 1

Ahora calcularemos cuantos miligramos de Na^+ hay en 100 gr de suelo:

$$\text{mg} = \text{me} * \frac{\text{peso atómico}}{\text{valencia}}$$

$$\text{mg} = 0.25 * \frac{23}{1}$$

$$\text{mg} = 5.75$$

$$5.75 \text{ mg} = 0.00575 \text{ gr}$$

Por lo tanto, podemos decir que en 100 gr de suelo hay 0.00575 gr Na^+ . Sabemos que en 1 hectárea de suelo a una profundidad de 30 cm hay un total de 4,260 toneladas (4,260,000 kg) de suelo, entonces podemos hacer la siguiente regla de tres:

Na^+	suelo
0.00575 kg.....	100 kg

$$X \dots\dots\dots 4,260,000 \text{ k} \quad \Rightarrow \quad \therefore X = 244.95 \text{ kg Na}^+ / \text{ha}$$

e) Aluminio (Al^{3+})

Tenemos la información: $\text{Al}^{3+} = 3.50 \text{ me}/100 \text{ gr}$

Sabemos:

peso atómico = 27

valencia = 3

Ahora calcularemos cuántos miligramos de Al^{3+} hay en 100 gr de suelo:

$$\text{mg} = \text{me} * \frac{\text{peso atómico}}{\text{valencia}}$$

$$\text{mg} = 3.50 * \frac{27}{3}$$

$$\text{mg} = 31.5$$

$$31.5 \text{ mg} = 0.0315 \text{ gr}$$

Por lo tanto, podemos decir que en 100 gr de suelo hay 0.0315 gr Al^{3+} . Sabemos que en 1 hectárea de suelo a una profundidad de 30 cm hay un total de 4,260 toneladas (4,260,000 kg) de suelo, entonces podemos hacer la siguiente regla de tres:

Al^{3+} suelo

0.0315 kg..... 100 kg

$$X \dots\dots\dots 4,260,000 \text{ kg} \quad \Rightarrow \quad \therefore X = 1,341.9 \text{ kg Al}^3 / \text{ha}$$

f) Hidrógeno (H^+)

Tenemos la información: $\text{H}^+ = 0.92 \text{ me}/100 \text{ gr}$

Sabemos:

peso atómico = 1

valencia = 1

Ahora, calcularemos cuántos miligramos de H^+ hay en 100 gr de suelo:

$$mg = me * \frac{\text{peso atómico}}{\text{valencia}}$$

$$mg = 0.92 * \frac{1}{1}$$

$$mg = 0.92$$

$$0.92 \text{ mg} = 0.00092 \text{ gr}$$

Por lo tanto, podemos decir que en 100 gr de suelo hay 0.00092 gr H^+ . Sabemos que en 1 hectárea de suelo a una profundidad de 30 cm hay un total de 4,260 toneladas (4,260,000 kg) de suelo, entonces podemos hacer la siguiente regla de tres:

H^+	suelo
0.00092 kg.....	100 kg
X.....	4,260,000 kg => $\therefore X = 39.2 \text{ kg } H^+ /ha$

Problema N°10

Se tiene una parcela de 1 ha con cultivo de tomate, cuyo análisis de suelo arroja los siguientes datos:

Textura	: franco-arcillosos
Densidad aparente	: $1.28 \text{ g/cm}^3 = 1.28 \text{ t/m}^3$
pH	: 6.1
Cond. Eléctrica	: 1.16 mmhos/cm
Materia orgánica	: 3.9%
Nitrógeno	: 28 ppm
Fósforo	: 19 ppm
Potasio	: 100 ppm
Profundidad de raíces	: 0.25 m

La fórmula de fertilización que requiere el cultivo es de 260–90–350 (N, P_2O_5 , K_2O).

Los fertilizantes comerciales que se encuentran en el mercado de la zona son:

- Úrea, que tiene 46% de N
- Superfosfato triple, que tiene 46% de P_2O_5
- Sulfato de Potasio, que tiene 52% de K_2O

Eficiencia N–P–K en la solución del suelo:

Elemento	Eficiencia (%)
N	50%
P	30%
K	65%

Solución:

Peso del suelo (P_s) de 1 ha = $100\text{ m} \times 100\text{ m} \times P_{\text{raíces}} \times d_{\text{ap}}$

Donde $P_{\text{raíces}}$ es la profundidad de raíces, reemplazando valores, se tiene:

$$P_s = 10,000\text{ m}^2 \times 0.25\text{ m} \times 1.28\text{ t/m}^3$$

$$P_s = 3,200\text{ t} = 3,200,000\text{ kg} = 3,200\text{ ton}$$

Aporte de nutrientes N, P, K del suelo (A_{ns}) en una hectárea:

a) Cantidad de Nitrógeno (N):

28 ppm => 28 gramos..... 1,000 kg de suelo (1×10^6 gramos)

X 3,200,000 kg de suelo/ha

Luego:

$$X = \frac{(3,200,000\text{ kg}) \times (28\text{ gr})}{(1,000\text{ kg})} = 89,600\text{ gramos/ha}$$

$$\therefore \boxed{X = 89.6\text{ kg/ ha de N}}$$

b) Cantidad de Fósforo (P_2O_5):

19 ppm $\Rightarrow$ 19 gramos..... 1,000 kg de suelo ($1 \cdot 10^6$ gramos)

X 3'200,000 kg de suelo/ha

Luego:

$$X = \frac{(3'200,000 \text{ kg}) * (19 \text{ gr})}{(1,000 \text{ kg})} = 60,800 \text{ gramos/ha}$$

$$\therefore \boxed{X = 60.8 \text{ kg / ha de } P_2O_5}$$

c) Cantidad de Potasio (K_2O):

100 ppm $\Rightarrow$ 100 gramos 1,000 kg de suelo ($1 \cdot 10^6$ gramos)

X 3'200,000 kg de suelo/ha

Luego:

$$X = \frac{(3'200,000 \text{ kg}) * (100 \text{ gr})}{(1,000 \text{ kg})} = 320,000 \text{ gramos/h}$$

$$\therefore X = 320 \text{ kg / ha de } K_2O$$

Dosis de Fertilización a ser aplicada (D_f):

$$\boxed{D_f = (D_{rc} - A_{ns})/E_{fer}}$$

Donde:

D_f = Dosis de fertilización (kg/ha)

D_{rc} = Dosis requerida por el cultivo (kg/ha)

A_{ns} = Aporte de nutrientes del suelo (kg/ha)

E_{fer} = Eficiencia del fertilizante

a) Cantidad de Nitrógeno (N):

La fórmula de fertilización que requiere el cultivo es de 260–90–350; por lo tanto en 1 hectárea de cultivo se requieren 260 kg de Nitrógeno. Se calculó que en el suelo hay 89.6 kg de N en 1 hectárea, y se sabe que la

eficiencia del nitrógeno en la solución del suelo es del 50%:

$$D_N = (260.00 - 89.60) / 0.5 = 340.8 \text{ kg de N son requeridas para 1 ha}$$

Utilizando úrea como fuente de nitrógeno:

$$100 \text{ kg de úrea} \dots\dots\dots 46 \text{ kg de N}$$

$$X \dots\dots\dots 340.8 \text{ kg de N}$$

$$X = \frac{340.8 * 100}{46} = \boxed{740.87 \text{ kg de úrea/ha}}$$

b) Cantidad de Fósforo (P_2O_5):

La fórmula de fertilización que requiere el cultivo es de 260–90–350; por lo tanto en 1 hectárea de cultivo se requieren 90 kg de P_2O_5 . Se calculó que en el suelo hay 60.8 kg de P_2O_5 en 1 hectárea, y se sabe que la eficiencia del P_2O_5 en la solución del suelo es del 30%:

$$D_{fp} = (90.00 - 60.80) / 0.30 = 97.3 \text{ kg de } P_2O_5 / \text{ha}$$

Utilizando superfosfato triple (SFT) como fuente de fósforo:

$$100 \text{ kg de SFT} \dots\dots\dots 46 \text{ kg de } P_2O_5$$

$$X \dots\dots\dots 97.3 \text{ kg } P_2O_5$$

$$X = \frac{97.3 * 100}{46} = \boxed{211.52 \text{ kg de SFT/ha}}$$

c) Cantidad de Potasio (K_2O):

La fórmula de fertilización que requiere el cultivo es de 260–90–350; por lo tanto en 1 hectárea de cultivo se requieren 350 kg de K_2O . Se calculó que en el suelo hay 320 kg de K_2O en 1 hectárea, y se sabe que la eficiencia

del K_2O en la solución del suelo es del 65%:

$$D_{fk} = (350-320)/0.65 = 46.15 \text{ kg de } K_2O /ha$$

Utilizando sulfato de potasio (K_2SO_4) como fuente de potasio:

$$100 \text{ kg de } K_2SO_4 \dots\dots\dots 52 \text{ kg de } K_2O$$

$$X \dots\dots\dots 46.15 \text{ kg } K_2O$$

$$X = \frac{46.15 * 100}{52} = \boxed{88.75 \text{ kg de } K_2SO_4 /ha}$$

Rpta:

Se tendrá que comprar:

740.87 kg de urea => 14.82 bolsas $\cong$ 15 bolsas
(cada bolsa de 50 kg c/u)

211.52 kg de SFT => 4.23 bolsas $\cong$ 5 bolsas

88.75 kg de K_2SO_4 => 1.78 bolsas $\cong$ 2 bolsas

CAPÍTULO XI

AGUA VIRTUAL Y HUELLA HÍDRICA

11.1 Definición de agua virtual

La teoría del agua virtual (AV) fue propuesta por el británico John Anthony Allan en el año 1993. Esta teoría potencia el uso del comercio para aliviar la escasez de agua en algunas regiones del planeta y poder usar de forma más eficiente y eficaz los recursos hídricos disponibles, tanto en los países con escasez o abundancia de agua.

El contenido de agua de un producto, ya sea un bien o un servicio, representa la cantidad de agua dulce que se ha requerido para fabricarlo, producirlo u obtenerlo; considerando todas sus etapas de producción. Por ello, cada vez que se menciona el término “agua virtual” se está refiriendo al volumen total de agua dulce consumida, ya sea en forma directa o indirecta, en la producción o fabricación del bien o servicio.

Un comercio racional de agua virtual debe consistir en orientar la producción de forma tal que países con alta disponibilidad de agua produzcan, y exporten productos que consumen alta cantidad de agua. En cambio, países con escasa disponibilidad de agua (áridos o semiáridos) deben especializarse en la producción y exportación de productos que consuman bajos volúmenes de agua y de alta demanda y buenos precios en el mercado mundial y que a su vez en caso que requieran importar productos de alto consumo de agua que lo hagan, pues es lo más recomendable para ellos desde el punto

de vista económico. Un ejemplo de ello puede consistir que en una zona árida no se cultive arroz, pero sí tomate, papa, frutas, hortalizas, etc. En ese caso, les resultaría más recomendable importar arroz, pues este cultivo consume mucha cantidad de agua para su producción.

11.2 Comercio de agua virtual

El comercio de agua virtual se refiere básicamente al flujo de transacciones económicas o de solidaridad de productos o servicios entre un proveedor (vendedor o brindador) y un receptor (comprador o beneficiario) y como cada producto o servicio consume cierta cantidad de agua para producirlo o brindarlo, entonces dichas transacciones se traducen en términos de agua consumida. En este caso, se llama flujo de agua virtual o llamado también comercio de agua virtual.

11.3 Huella hídrica (HH)

La huella hídrica de un país, o una persona se define como el volumen total de agua dulce utilizado al año para producir los bienes y servicios que consume ya sea un país, una industria o una persona. En consecuencia, la huella hídrica es un indicador de la cantidad de agua que consume una persona.

El comercio internacional global de productos implica un volumen global de flujos de agua virtual superior a los 1,600 km³. Alrededor del 80% de este volumen de agua, está relacionado con el comercio de productos agropecuarios.

El consumo de agua virtual se puede reducir si el intercambio de productos se da entre países con alta productividad de agua y países con baja productividad de agua.

A continuación, se presenta una relación de requerimientos promedio de agua para obtener o producir cada uno de los productos que se mencionan:

Producto	Agua virtual o consumida para producirlo (litros)
1 vaso de cerveza (250 ml)	75
1 vaso de leche (200 ml)	170 – 500
1 taza de café (125 ml)	140
1 taza de té (250 ml)	35
1 porción de pan (30 gr)	40
100 gr de queso	500
1 kg de papa	250 – 600
1 kg de manzana	700
1 camisa de algodón (500 gr)	4,100
1 hoja de papel A4 (80 gr/m ²)	10
1 vaso de vino (125 ml)	120
1 vaso de jugo de naranja (200 ml)	170
1 bolsa de papa frita (200 gr)	185
1 huevo (40 gr)	135 – 200
1 hamburguesa (150 gr)	2,400
1 tomate (70 gr)	12 – 14
1 par de zapatos de piel de vacuno	7,000 – 8,000
1 ton cerveza	300,000
1 litro de coca cola	175 – 200
1 plato descartable	29
1 microchip (2 gr)	32
1 kg arroz pelado	1,500 – 3,500
1 kg maíz	600 – 900
1 kg trigo	1,000 – 1,350
1 kg de carne de vacuno	13,000 – 30,000
1 litro de leche	1,000
1 kg de queso	5,000 – 7,000
1 kg carne de pollo	2,500
1 kg carne de ave	3,000 – 6,000
1 kg huevo	2,300 – 3,400
1 kg azúcar	1,000 – 1,500
1 kg carne de cerdo	5,000 – 6,000
1 kg carne caprino	3,000 – 8,000
1 lt de coca cola	350
1 lt de jugo naranja	1,600
1 kg de pan	2,200
1 kilowatt-hora	180
1 flor de rosa	9
1 barril de petróleo (extraerlo)	400 – 800
1 hamburguesa	2,200 – 2,600
1 manzana	70
1 TM de acero	300 m ³

Una persona con un nivel de vida medio a alto “consume” en total entre 4.5 a 8.0 m³ de agua/día; mientras que una persona con un nivel de vida bajo a muy bajo (pobreza a pobreza extrema) consume en promedio en total entre 0.5 a 1.0 m³/día. El consumo de agua de una persona comprende: el agua usada para beber, cocinar, aseo, lavar ropa, papel, producción de madera, acero, alimentos, etc.

La huella hídrica per cápita promedio de China es de alrededor de 700 m³/año (1.92 m³/día). Sólo cerca del 7% de dicha huella hídrica proviene de fuera de China.

Por otro lado, Japón tiene una huella hídrica per cápita promedio de unos 1,150 m³/año (3.15 m³/día), un 65% de esta huella proviene del exterior.

La huella hídrica per cápita de EE.UU es de unos 2,480 m³/año (6.79 m³/día).

La huella hídrica per cápita promedio de España es de unos 2,325 m³/año (6.37 m³/día); un 36% de esta huella corresponde al exterior.

El promedio mundial per cápita de la huella hídrica bordea los 1,240 m³/año (3.40 m³/día).

Es de remarcar que se ahorra agua al exportar productos agrícolas de regiones con alta productividad de agua a regiones con baja productividad de agua. Si los países importadores produjeran todos los productos agropecuarios que actualmente importan, necesitarían unos 1,600 km³/año; mientras que los países exportadores de tales productos sólo consumen para producirlos unos 1,200 km³/año; ahorrando a nivel global unos 400 km³/año de agua dulce.

El consumo per cápita de agua virtual –huella hídrica per cápita– contenido en la alimentación diaria varía según el tipo de dieta:

Dieta de supervivencia Menor de 1 m³/día

Dieta vegetariana Alrededor de 2.6 m³/día

Dieta en base a carnes Mayor a 5.0 m³/día

A nivel individual, la huella hídrica es igual a la cantidad total de agua virtual de todos los productos consumidos y servicios utilizados por la persona. La huella hídrica individual debe servir a la persona para utilizar el agua con mayor precaución o eficiencia y fortalecer su cultura por el agua.

La huella hídrica de un país equivale al total de la suma de agua del consumo doméstico y la importación de agua virtual del país, menos la exportación de su agua virtual.

La huella hídrica de una nación es un indicador útil de la demanda del país respecto a los recursos hídricos del planeta. Además, le sirve para plantear y definir su política económica, industrial, agraria, energética y ambiental a seguir a corto, mediano y largo plazo.

El análisis de las importaciones y exportaciones de esta agua virtual es un punto de vista novedoso, y considera el consumo real de agua. Con esta información, los gobiernos cuentan con una herramienta mucho mejor para planificar su economía en relación a la escasez de agua, promoviendo la producción y exportación de productos “caros en agua” en los países con excedentes importantes de agua y animando a su importación en los países que sufren estrés hídrico.

El concepto de huella hídrica fue creado para obtener un indicador que relacione al agua con el consumo -a todos los niveles- de la población.

El concepto de huella hídrica es un concepto introducido en el año 2002 por el investigador Arien Hoekstra, con la finalidad de que se utilice como un indicador adicional a los tradicionalmente basados en la producción.

La huella hídrica puede ser interna, cuando se considera al agua procedente de los recursos naturales del país; y externa, cuando se toma en cuenta la cantidad de agua necesaria para desarrollar los productos o servicios consumidos en un país, cuando éstos han sido producidos en el exterior. Como para reflexionar a continuación se presenta el consumo de agua de una pareja en una cita:

2 enamorados consumen agua en una cita
(cada persona)

• 1 copa de vino	_____	120 l
• Piqueo 50 gr de queso	_____	250 l
• 1 pan de molde	_____	40 l
• Carne de pollo: 200 gr	_____	790 l
• 1 porción arroz: 150 gr	_____	510 l
• 1 taza de café	_____	140 l
Total:	_____	1,850 l

La pareja consumirá en la cita: 3,700 l de agua

Agua virtual exportada: Disminuye la oferta o disponibilidad de agua de una región o país al exportarse productos o servicios, generándose un transvase de agua virtual a favor del país o región que los importa.

Agua virtual importada: Incrementa la oferta de agua de una región o país y productos o servicios al producirse el trasvase virtual de agua: Importan productos hacia una zona deficitaria de agua, donde no se producen en dicha zona.

Hookstra (2003) define a la huella hídrica de un país como “el volumen de agua necesaria para producir los bienes y servicios consumidos por los habitantes de ese país”, y lo define como un indicador del uso de agua en relación al consumo de la población.

Huella hídrica interna (HHI), es el uso interno de agua para producir los bienes y servicios consumidos por los habitantes del propio país”.

Huella hídrica externa (HHE), es definida como el volumen de agua utilizado por otros países para producir bienes y servicios consumidos por los habitantes del país que importa dichos bienes o servicios.

La huella hídrica proporciona información sobre los flujos comerciales en términos de agua, al igual que agua virtual, mediante los conceptos de agua virtual importada y agua virtual exportada.

El agua virtual es un indicador sobre los requerimientos de agua desde el punto de vista de la producción. Por otro lado, la huella hídrica es un indicador de los requerimientos de agua desde la perspectiva del consumo.

$HHL = AV \text{ agricultura} + AV \text{ industria} + AV \text{ sector doméstico} - AV \text{ exportada}.$

11.4 Uso de los conceptos de agua virtual y huella hídrica

Los conceptos de agua virtual y huella hídrica van adquiriendo cada vez una mayor importancia, debido a que al crecer la demanda de agua dulce por el incremento de la población y los otros factores; se va haciendo paralelamente cada vez más escasa el agua en diferentes regiones o países del mundo. Ante esta situación, estos dos conceptos sirven para:

- Definir, según su disponibilidad de agua, políticas para la producción de bienes y servicios que pueda llevar a cabo un país o una región a fin de lograr maximizar sus beneficios.
- Definir políticas que permitan un cambio de los hábitos de consumo de bienes y servicios de la población de un país o una región, según su disponibilidad de agua.
- Definir políticas de gestión y manejo del agua que permitan su aprovechamiento eficiente, eficaz y sostenible en un país o una región.
- Promover e impulsar las acciones necesarias para lograr que las personas tengan una cultura y valoración del agua como elemento fundamental de la vida.
- Promover e impulsar la participación activa de la sociedad en la problemática del agua y sus alternativas de solución.

El promedio mundial del consumo total de agua virtual de los años 90 al 95 correspondió:

Trigo: 30% del consumo total de agua virtual

Arroz: 15% del consumo total de agua virtual

Soya: 17% del consumo total de agua virtual

HHE = AV importada - AV de productos importados y que no son consumidos en el país y que son reexportados.

HH = AV utilizada durante los diferentes procesos productivos + AV del proceso de distribución (agua que se requiere o que se consume durante todo el proceso de transporte del producto desde el lugar de producción hasta el lugar de consumo).

Agua Virtual de la Energía, se refiere al agua necesaria para producir la energía consumida por el transporte.

Por lo tanto, finalmente:

HH = AV de los diferentes procesos productivos + AV de la energía usada en la distribución.

Cuando se consume el producto o servicio en el mismo lugar, cuantitativamente se tendrá:

$$HH = AV$$

Cuando las transacciones comerciales o el consumo, no es local:

$$HH > AV$$

Clases de Agua Virtual: Al agua virtual se la puede clasificar de acuerdo a su origen:

- **Agua virtual azul (AV_{azul})**, comprende a las aguas superficiales y/o subterráneas y que son utilizadas en la producción del bien o servicio.
- **Agua virtual verde (AV_{verde})**, es el volumen de agua de lluvia que se almacena en el suelo y que es usada durante el proceso de producción de un bien o un servicio.
- **Agua virtual gris (AV_{gris})**, se refiere al agua contaminada o agua servida que resulta de la producción de bienes y servicios.

La relación de la huella hídrica (HH) con las clases de agua virtual se tiene:

$$HH = AV_{\text{azul}} + AV_{\text{verde}} + AV_{\text{gris}}$$

Según la UNESCO:

- El 67% del comercio global de agua virtual está relacionado con los cultivos.
- 23% con productos cárnicos y ganado.
- 10% con productos industriales.

± El 15% del agua utilizada en el mundo se destina a la exportación en forma de agua virtual.

HH_{de una nación}: Indicador útil de la demanda del país respecto a los recursos hídricos del planeta.

A continuación se presenta información sobre huella hídrica per cápita promedio de diferentes países; así mismo se presenta información sobre el contenido de agua virtual de algunos productos y según el país donde se produjo.

Huella hídrica per cápita promedio de varios países

País	(m ³ /persona-años)	País	(m ³ /persona-años)
China	1,100	Israel	2,300
India	1,100	Italia	2,300
Chile	1,150	Australia	2,350
Pakistán	1,340	Canadá	2,380
Japón	1,360	España	2,470
Holanda	1,450	EE.UU.	2,850
Argentina	1,600	Emiratos Árabes	3,100
Reino Unido	1,698	Bolivia	3,450
Arabia Saudita	1,800	Níger	3,518
Rusia	1,800		
Brasil	2,050		
México	1,980		

Fuente: Elaboración propia

Contenido de agua virtual de algunos productos y según países productores

Contenido neto de agua virtual de algunos productos (m ³ /ton)						
País Producto	China	Japón	Australia	EE.UU.	Brasil	Promedio Mundial
Trigo	690	734	1,588	849	1,616	1,300
Arroz pelado	1,972	1,822	1,525	1,903	4,600	3,400
Carne de pollo	3,652	2,977	2,914	2,389	3,913	3,900
Soya	2,617	2,326	2,106	1,869	1,076	1,800
Maíz	801	1,493	744	489	1,180	900
Leche fresca	1,000	812	915	695	1,001	1,000
Leche en polvo	4,648	9,774	4,255	3,234	1,654	4,600
Carne de res	12,560	11,019	17,112	13,193	16,961	15,500
Carne de cerdo	2,211	4,962	5,909	3,946	4,818	4,850

Finalmente a continuación se presenta un análisis de la huella hídrica promedio para un consumidor del Reino Unido y para la crianza de una vaca.

Huella hídrica de un consumidor promedio del Reino Unido

El consumo de agua de un consumidor promedio del Reino Unido es la siguiente:

- a. **Uso en casa (3%)**
 - 200 l/persona/día, como agua líquida
- b. **Consumo o utilización de productos obtenidos en el mercado (97%)**
 - 3,400 l/día productos agrícolas
 - 1,100 l/día productos industriales

Esta cantidad de agua, se considera como agua invisible.

En consecuencia la huella hídrica per cápita será de 4,700 l/día; que significa también:

1,715.5 m³/persona – año
--

De esta huella hídrica, en promedio alrededor del 60% recae fuera del país. Además es de resaltar que la dieta de un consumidor constituye el mayor componente de la huella hídrica.

Huella hídrica de una vaca

Una vaca consume durante su vida la siguiente cantidad promedio de agua:

a. Alimentos (99% agua)

- 1,300 kg de granos (maíz, cebada, trigo, soya, etc.)
- 7,200 kg de forraje (pastos, heno, etc.)

b. Agua (1% agua)

- 24,000 lt para beber
- 7,000 lt para limpieza y mantenimiento

200 kg de pura carne (sin hueso)	3,100 m³ de agua
---	------------------------------------

CAPÍTULO XII

MEDICIÓN DEL CAUDAL DE AGUA

12.1 Caudal

Es la cantidad de agua que pasa por un lugar o punto determinado ya sea de un canal, acequia, río, etc y en un cierto tiempo determinado. Es decir, corresponde a un volumen de agua por unidad de tiempo. La unidad básica del caudal en el sistema internacional está expresado como “metro cúbico por segundo” (m^3/s). Sin embargo, existen otras formas de cómo se puede expresar el caudal:

Metro cúbico por minuto	: m^3/min
Metro cúbico por hora	: m^3/h
Litro por segundo	: l/s
Litro por minuto	: l/min
Litro por hora	: l/h
Pie cúbico por segundo	: ft^3/s

12.2 Métodos para la medición de caudales

Entre los métodos más utilizados para medir el caudal de agua, se tienen:

1. Método del flotador,
2. Método volumétrico,
3. Estructuras de medición de agua,
4. Método del correntómetro, y
5. Método del limnómetro o carga piezométrica.

1. Método del flotador

Este método es práctico; y se utiliza en canales, acequias y ríos. Sin embargo, sólo sirve para dar una medida aproximada del caudal, pues no es muy exacto.

Para aplicar este método, se escoge un tramo recto de canal o acequia que tenga una sección transversal uniforme y una longitud de unos 20 a 50 m de largo y donde el agua escurra libremente y en forma tranquila.

Determinación de la velocidad de flujo (V)

En el tramo escogido del terreno, se ubican dos puntos (inicial y final). Luego, se lanza el flotador en el punto inicial aguas arriba y con un cronómetro se mide el tiempo que demora en llegar al punto final. Esta operación se debe repetir por lo menos unas 4 a 5 veces y sobre la base de ello se determina un tiempo promedio. Basado en estos datos de longitud (L) y tiempo promedio (t), se obtiene la velocidad superficial promedio del agua en esa sección (V_s):

$$V_s = \frac{L}{t} = \frac{\text{Longitud del tramo usado (m)}}{\text{Tiempo promedio transcurrido (s)}} = (\text{m/s})$$

La velocidad promedio del agua (V_m) en el canal o río es igual a $0.85 V_s$.

Es de remarcar que como flotador se puede utilizar un corcho, un pedazo de madera, una hoja de árbol o cualquier otro material que no ofrezca resistencia al contacto con el aire y que se deje arrastrar fácilmente por la corriente de agua. El pedazo de madera puede ser de 1 x 1 x 4 pulgadas.

Determinación del área del canal o río (A)

El siguiente paso en este método consiste en determinar o calcular el área transversal del canal o acequia. Para ello, si se trata de una sección regular:

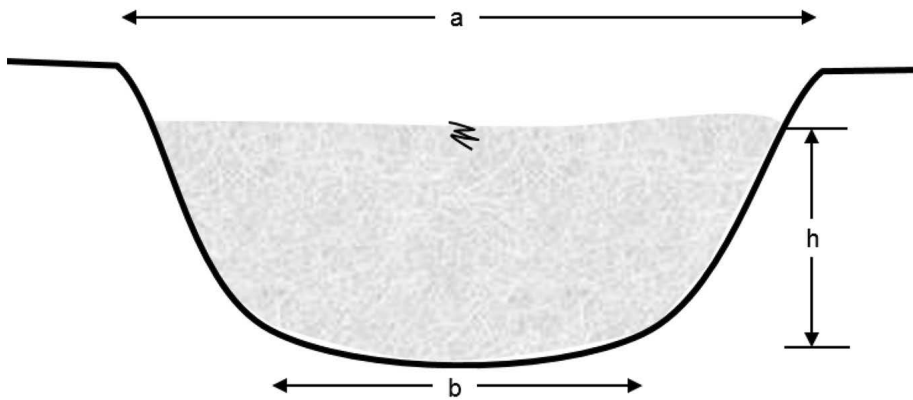


Figura N°1.- Sección transversal de un canal rectangular

$$\text{Área de la sección} = \frac{(a + b)}{2} * h$$

En una sección irregular se tiene:

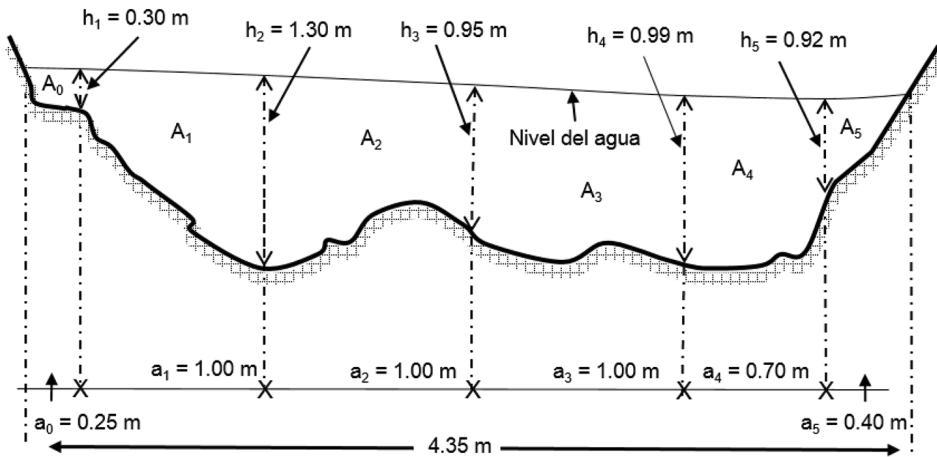


Figura N°2.- Sección transversal típica de una acequia o canal de tierra

El área de la sección se calcula:

$$A_0 = \frac{(0+h_1)}{2} * a_0$$

$$A_1 = \frac{(h_1+h_2)}{2} * a_1$$

$$A_2 = \frac{(h_2+h_3)}{2} * a_2$$

$$A_3 = \frac{(h_3+h_4)}{2} * a_3$$

$$A_4 = \frac{(h_4+h_5)}{2} * a_4$$

$$A_5 = \frac{(h_5+0)}{2} * a_5$$

Luego, el área de la sección será:

$$A = A_0 + A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5$$

Determinación del caudal (Q):

Conocida la velocidad superficial promedio (V_s) del agua y el área de la sección transversal (A) del canal, se aplica la siguiente fórmula para calcular el caudal (Q):

$$Q = A * V_s * 850$$

ó

$$Q = A * V_m$$

=>

$$V_m = 850 V_s$$

Donde:

Q = Caudal en (l/s),

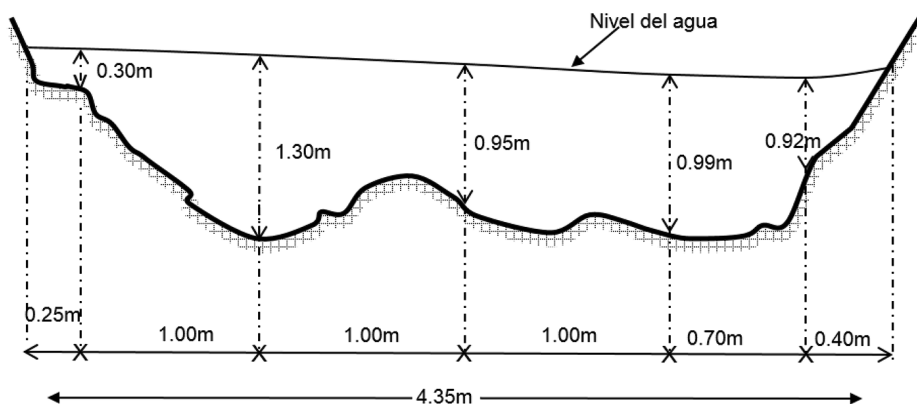
A = Área de la sección del canal (m^2),

V_s = Velocidad superficial promedio (m/s); y

V_m = Velocidad promedio del agua (m/s).

Ejemplo de aplicación 1:

Dado el perfil transversal de una acequia:



Se quiere determinar el caudal de agua que pasa por la acequia. La línea de energía del flujo de agua está formada por:

- **La energía estática**, representada por la carga de agua: h_e
- **La energía dinámica**, que depende de la velocidad de flujo: $h_d = \frac{v^2}{2g}$

En consecuencia, la altura de energía (H) estará dada por:

$$H = h_e + h_d = h_e + \frac{V_s^2}{2g}$$

El problema consiste en determinar el caudal Q (m^3/s) que pasa por la acequia; si se conoce que:

V_m = Velocidad superficial media o promedio (m/s)

V_s = Velocidad en la superficie o superficial promedio (m/s)

L = Distancia a recorrer por el flotador (m)

t_i = Tiempo que demora en recorrer la distancia L_i en cada prueba (s)

t_m = Tiempo promedio (s)

A = Área transversal de la acequia (m^2)

A_i = Área parcial de cada sección (m^2)

La velocidad promedio del agua en el río o acequia es aproximadamente igual a 0.85 veces la velocidad superficial.

Fórmulas utilizadas

$$Q = A * V_m \quad V_m = 0.85 V_s \quad A = A_0 + A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n$$

Cálculo del área transversal: A

$$A_1 = \frac{(0.0 + 0.30)}{2} * 0.25 = 0.0375m^2$$

$$A_2 = \frac{(0.30 + 1.30)}{2} * 1.00 = 0.80m^2$$

$$A_3 = \frac{(1.30 + 0.95)}{2} * 1.00 = 1.125m^2$$

$$A_4 = \frac{(0.95 + 0.99)}{2} * 1.00 = 0.97m^2$$

$$A_5 = \frac{(0.99 + 0.92)}{2} * 0.70 = 0.6685m^2$$

$$A_6 = \frac{(0.92 + 0.00)}{2} * 0.40 = 0.184m^2$$

Luego, el área transversal será igual:

$$A = 0.0370 + 0.8000 + 1.1250 + 0.9700 + 0.6685 + 0.1840$$

$$A = 3.785 \text{ m}^2$$

Cálculo de la velocidad promedio (V_m)

La prueba para calcular la velocidad promedio (V_m) se efectuó con 4 repeticiones, arrojando los siguientes datos:

$L = 50 \text{ m}$ (distancia a ser recorrida por el flotador)

Prueba N°1	$L_1 = 50 \text{ m}$	$t_1 = 125 \text{ s}$
Prueba N°2	$L_2 = 50 \text{ m}$	$t_2 = 135 \text{ s}$
Prueba N°3	$L_3 = 50 \text{ m}$	$t_3 = 118 \text{ s}$
Prueba N°4	$L_4 = 50 \text{ m}$	$t_4 = 142 \text{ s}$
Prueba N°5	$L_5 = 50 \text{ m}$	$t_5 = 122 \text{ s}$

El tiempo promedio será:

$$t_m = \frac{125 + 135 + 118 + 142 + 122}{5} = 128.4 \text{ s}$$

Luego, la velocidad superficial promedio será:

$$V_s = \frac{50 \text{ m}}{128.4 \text{ seg}} = 0.389 \text{ m/s}$$

Determinación del Caudal

$$V_m = 0.85V_s = 0.85 (0.389 \text{ m/s}) = 0.3306 \text{ m/s}$$

$$Q = A + V_m (3.785 \text{ m}^3) * (0.3306 \text{ m/s}) = 1.2513 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q = 1.2513 \text{ m}^3/\text{s}$$

Rpta:

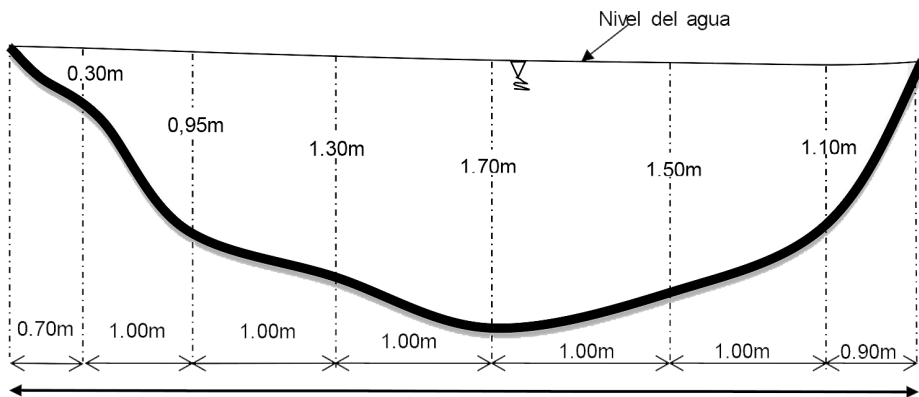
El caudal que pasa por la acequia tendrá un valor aproximado de 1.2513 m³/s.

Ejemplo de aplicación 2:

Se escogió un tramo de 35 metros, donde se tomaron 5 lecturas del tiempo que demora el flotador en recorrer el tramo escogido. Los tiempos mencionados son los siguientes:

$$t_1 = 135 \text{ s} \quad t_2 = 136 \text{ s} \quad t_3 = 128 \text{ s} \quad t_4 = 132 \text{ s} \quad t_5 = 130 \text{ s}$$

El perfil transversal promedio de la acequia es el mostrado en la siguiente figura:



Se pide calcular el valor del caudal que pasa por la acequia. Lo primero que se tiene que hacer es calcular el tiempo promedio:

$$t_m = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5}{5}$$

Reemplazando valores:

$$t_m = \frac{135 + 136 + 128 + 132 + 130}{5} = 132,20 \text{ s}$$

Ahora, se puede calcular el valor de la velocidad superficial promedio (V_s) con el uso de la fórmula:

$$V_s = \frac{L}{T}$$

Reemplazando valores, se tiene:

$$V_s = \frac{35 \text{ m}}{132.2} \Rightarrow \boxed{V_s = 0.26 \text{ m/s}}$$

Ahora que se conoce el valor de la velocidad promedio de la superficie, se procede a calcular el valor promedio de la velocidad (V_m) en el canal:

$$\boxed{V_m = C * V_s}$$

En este caso, se considera que C tiene un valor de 0.85; C es un coeficiente de corrección de la velocidad superficial, el cual varía entre 0.55 hasta 1.0; siendo lo más adecuado utilizar en promedio el valor de 0.80 a 0.85.

$$V_m = C * V_s$$

Reemplazando valores:

$$V_m = 0.85 * (0.26 \text{ m/s}) = 0.22 \text{ m/s}$$

Ahora, calculando el área transversal de la acequia, se tiene:

$$A = A_0 + A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6 + A_7$$

$$A_1 = \frac{(0 + 0.30 \text{ m})}{2} * (0.7 \text{ m}) = 0.105 \text{ m}^2$$

$$A_2 = \frac{(0.30 + 0.95 \text{ m})}{2} * (1 \text{ m}) = 0.625 \text{ m}^2$$

$$A_3 = \frac{(0.95 + 1.3 \text{ m})}{2} * (1 \text{ m}) = 1.125 \text{ m}^2$$

$$A_4 = \frac{(1.3 + 1.7 \text{ m})}{2} * (1 \text{ m}) = 1.5 \text{ m}^2$$

$$A_5 = \frac{(1.7 + 1.5 \text{ m})}{2} * (1 \text{ m}) = 1.6 \text{ m}^2$$

$$A_6 = \frac{(1.5 + 1.1 \text{ m})}{2} * (1 \text{ m}) = 1.3 \text{ m}^2$$

$$A_7 = \frac{(1.1 + 0 \text{ m})}{2} * (0.9 \text{ m}) = 0.495 \text{ m}^2$$

Sumando cada una de las áreas parciales pertenecientes al área total de la sección transversal, se tiene lo siguiente:

$$A = 0.105 \text{ m}^2 + 0.625 \text{ m}^2 + 1.125 \text{ m}^2 + 1.5 \text{ m}^2 + 1.6 \text{ m}^2 + 1.3 \text{ m}^2 + 0.495 \text{ m}^2$$

$$A = 6.75 \text{ m}^2$$

Finalmente, calculando el caudal, se tendrá lo siguiente:

$$Q = A * V_m \quad \Rightarrow \quad Q = 0.22 \text{ m/s} * 6.75 \text{ m}^2$$

$$Q = 1.492 \text{ m}^3/\text{s}$$

Por lo tanto, el caudal estimado promedio que pasa por la acequia es de $1.492 \text{ m}^3/\text{s}$

2. Método volumétrico

Este método se utiliza cuando se va a medir pequeños caudales de agua que escurren por surcos, pequeños canales o acequias. Consiste en recibir el agua que escurre en un depósito de volumen conocido y en un determinado tiempo que demora en llenarse, en base a dichos datos se podrá calcular el caudal de descarga correspondiente.

$$Q = \frac{\text{Volumen del recipiente}}{\text{Tiempo de llenado}}$$

Ejemplo 3:

Se tiene un depósito de 1 m^3 de capacidad, y se llena en 5 minutos con el aporte de un chorro de agua ¿Cuál es el caudal de dicho chorro?

Solución:

$$Q = \frac{1 \text{ m}^3}{5 \text{ min}} = \frac{1,000 \text{ litros}}{300 \text{ segundos}} = 3.33 \text{ l/s} \quad \Rightarrow \quad Q = 3.33 \text{ l/s}$$

3. Método de la trayectoria del chorro de agua

Este método es muy utilizado, y cuenta con una precisión aceptable para determinar el caudal en tuberías y bombas. Es de fácil y rápida operación.

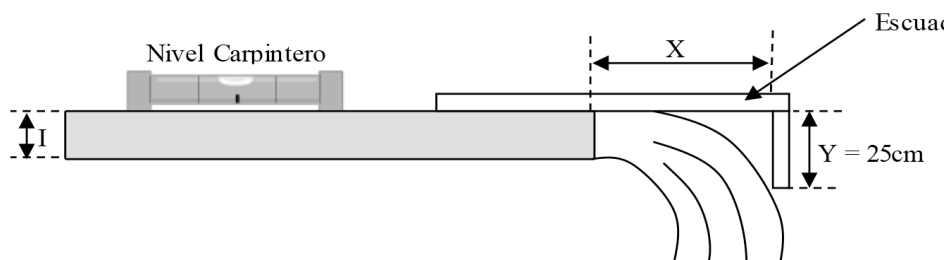


Figura N°3.- Determinación del caudal en una tubería horizontal llena de agua

En este método, se utiliza una escuadra como la mostrada en la figura 3. El lado más pequeño de la escuadra debe medir 25 cm, a fin de poder utilizar la talla adjunta. El lado más largo debe estar reposado sobre el tubo, el mismo que debe estar horizontal, la distancia X del chorro debe medirse desde la boca del tubo hasta el punto donde el chorro de agua toque la regla (lado vertical de la escuadra). En este método, se debe cuidar que la tubería esté horizontal y que descargue totalmente llena.

Para poder tener un caudal más próximo al verdadero, es conveniente realizar varias lecturas y promediar los resultados:

El caudal se determina conociendo el diámetro interior de la tubería y la distancia horizontal “X” de la escuadra. Sobre la base de estos datos, se entra al cuadro; y se determina el Q correspondiente.

Cuadro N°1.- Caudal en litros/segundo (l/s) para varios diámetros de tuberías

Distancia de la trayectoria horizontal en cm (X)	Diámetro de la tubería en pulgadas						
	2"	3"	4"	5"	6"	8"	10"
5	0.4	1.0	1.8	2.7	4.0	7.0	11.0
7.5	0.7	1.5	2.6	4.1	5.1	10.6	16.5
10.0	0.9	2.0	3.5	5.5	7.9	14.1	22.0
12.5	1.1	2.5	4.4	6.9	9.9	17.6	27.4
15.0	1.3	3.0	5.3	8.3	11.8	21.2	33.0
17.5	1.5	3.5	6.2	9.6	13.9	24.6	38.6
20.0	1.8	4.0	7.0	11.0	15.8	28.2	44.0
22.5	2.0	4.4	7.9	12.4	17.8	31.6	49.5
25.0	2.2	4.9	8.8	13.8	19.8	35.2	55.0
27.5	2.4	5.4	9.7	15.1	21.8	38.6	60.5
30.0	2.6	5.9	10.6	16.5	23.7	42.3	66.0
35.0	3.0	6.9	12.4	19.2	27.7	49.4	77.0
40.0	3.5	7.9	14.2	22.0	31.7	56.4	88.0
45.0	4.0	8.9	15.7	24.8	35.7	63.5	99.0
50.0	4.4	9.9	17.7	27.5	39.6	70.5	110.0
55.0	4.8	10.9	19.4	30.2	43.6	77.5	121.0
60.0	5.3	11.9	21.2	33.0	47.6	84.5	132.0

4. Estructuras de medición del caudal del agua

Uno de los métodos más eficientes y exactos para la medición de caudales de agua es aquel que utiliza estructuras especiales. Casi toda clase de obstáculo que restringe parcialmente la corriente de agua es una acequia o canal, y puede ser usado para la medición de caudales, siempre que se calibre adecuadamente. En este caso, se detallan sólo los más conocidos y de uso sencillo, como es el caso de los vertederos.

Para la medición del caudal de agua que pasa por un vertedero, es de importancia conocer el tipo de flujo del agua, ya sea flujo sumergido (flujo ahogado) o flujo libre. Según ello, se seleccionarán las fórmulas adecuadas.

Para un mejor entendimiento de cómo se ve el flujo longitudinal en un canal cuando se utiliza un vertedero, se presenta la siguiente figura 4:

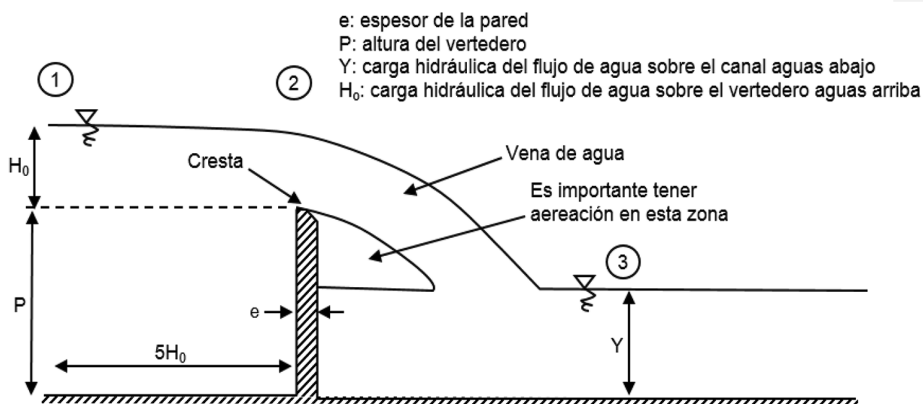


Figura N°4.- Corte longitudinal de un vertedero con flujo libre

En la figura 5, se puede apreciar un corte longitudinal de un vertedero donde se pueden ver algunos detalles recomendados para su construcción.

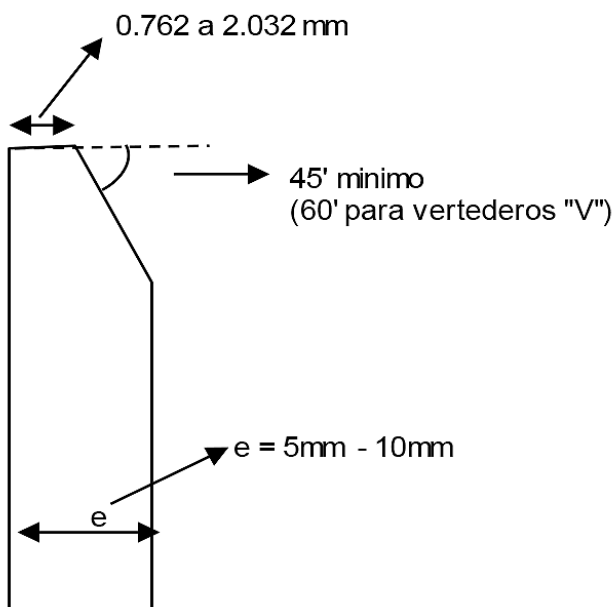


Figura N°5.- Detalles del espesor de la cresta de un vertedero (cortes longitudinal)

Para entender mejor lo referente a los vertederos sin contracción y con contracción, se presenta la Figura 6 que representa el corte transversal donde la primera figura representa a un vertedero rectangular sin contracciones; la segunda, a un vertedero rectangular con una contracción; y la tercera, a un vertedero rectangular con dos contracciones. En estas tres figuras, se puede apreciar que es necesario que en el primer y en el segundo caso se tenga una zona que permita una aeración adecuada para poder garantizar una lectura del caudal sin errores.

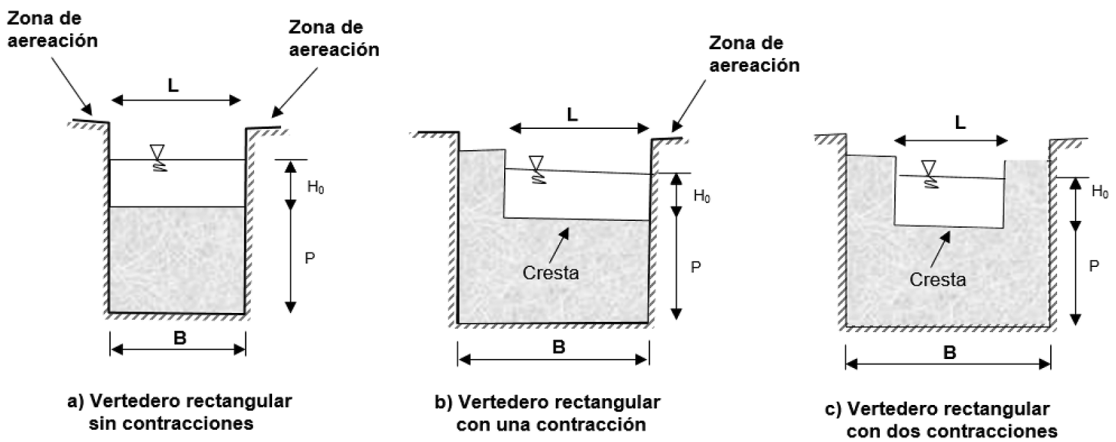


Figura N°6.- Corte transversal de tres tipos de vertederos rectangulares

También se muestra una vista de planta para estos tres tipos de vertederos, la misma que se puede ver en la Figura 7. En esta figura, se puede apreciar que la primera representa a un vertedero rectangular o sin contracciones; la segunda, a un vertedero rectangular con una contracción; y la tercera figura, a un vertedero rectangular con dos contracciones.

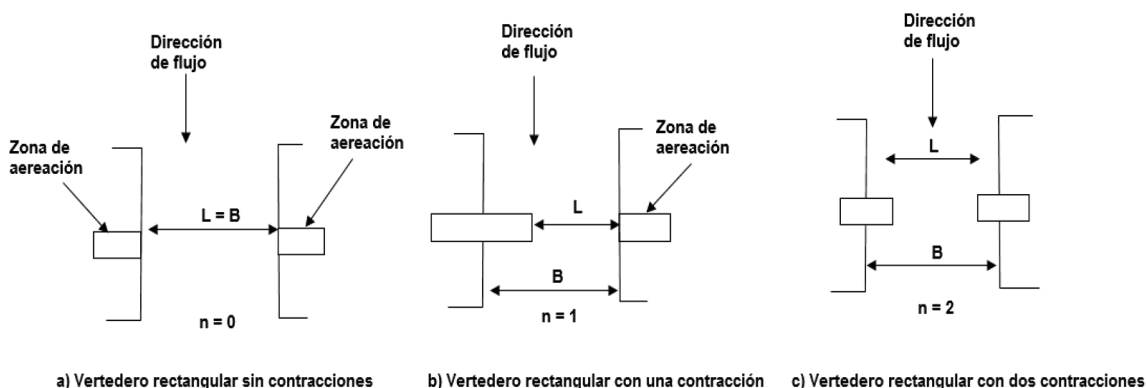


Figura N°7.- Vista de planta de tres tipos de vertederos rectangulares

A continuación, se mencionan algunas recomendaciones que se deben tener presente en el tema de los vertederos:

- La velocidad de aproximación del agua al vertedero debe ser inferior a 0.15 m/s. Esta velocidad debe ser medida aguas arriba a una distancia aproximada 10 veces el tirante o carga de agua sobre el vertedero.
- El espesor del material del vertedero deberá ser lo suficientemente grueso y que varíe entre 5 a 10 mm y resistente a la corrosión.
- De acuerdo a la USBR, el espesor de la cresta deberá variar entre 0.762 y 2.032 mm (0.03 a 0.08 pulgadas). La superficie de la cresta deberá ser plana y estar situada en forma perpendicular a la dirección del flujo. Además, esta superficie deberá tener una inclinación de 45° (para un vertedero rectangular) tal como se puede observar en las figuras 4 y 5.
- El vertedero debe ser colocado en un tramo del canal donde no se presente un flujo supercrítico, pues de hacerlo originará turbulencia aguas arriba a la posición del vertedero, ocasionando error al momento de medir el caudal.
- Colocar un empedrado o un colchón hidráulico en el área de caída del chorro de agua del vertedero a fin de proteger al canal de la erosión.
- Para medir el tirante de agua que pasa sobre la cresta del vertedero, debe colocarse una estaca con una rejilla graduada a una distancia aguas arriba de por lo menos 6 veces la carga (tirante) máxima que puede pasar por el vertedero, cuidando que el 0 (cero) de la rejilla coincida con la cresta del vertedero.

- Todo tipo de sedimento depositado aguas arriba del vertedero debe ser limpiado para poder tener una lectura adecuada.
- Se debe conocer qué tipo de flujo de agua está pasando por el vertedero (flujo libre o sumergido). Basado en ello, se podrán utilizar las formulas o ecuaciones adecuadas. La altura del vertedero va a influenciar en el comportamiento del flujo de agua, por lo que se deberá considerar una altura (P) lo suficientemente alta como para garantizar un flujo libre.
- Para tener una mayor precisión en la lectura del caudal, se recomienda que la lámina de agua que pasa por el vertedero (H_u) deberá ser mucho más pequeña que la altura del vertedero (P): $3 H_u < P$. Además, H_u debe ser mayor a 50 mm.
- El ancho de las contracciones en un vertedero deberá tener una longitud de por lo menos 2 veces la carga de agua H_u . Ver figura 6 y 7.

$$\left(\frac{B - L}{2}\right) > 2 H_u$$

Tipos de flujo de agua que pasa por un vertedero

Existen dos tipos de flujo de agua:

- Flujo libre
- Flujo sumergido o ahogado

a) Flujo libre:

En un flujo libre, la medida del tirante de agua ubicado aguas abajo del vertedero, según Figura 3, está representada por “Y” (punto 3 de la figura); es menor que la altura del vertedero (P), según Figura 3, que está representado por “P” (punto 2 de la figura).

$Y < P$

b) Flujo sumergido o ahogado:

En un flujo sumergido o ahogado, la medida del tirante de agua ubicado aguas abajo del vertedero es mayor que la altura de la cresta del vertedero, según Figura 9.

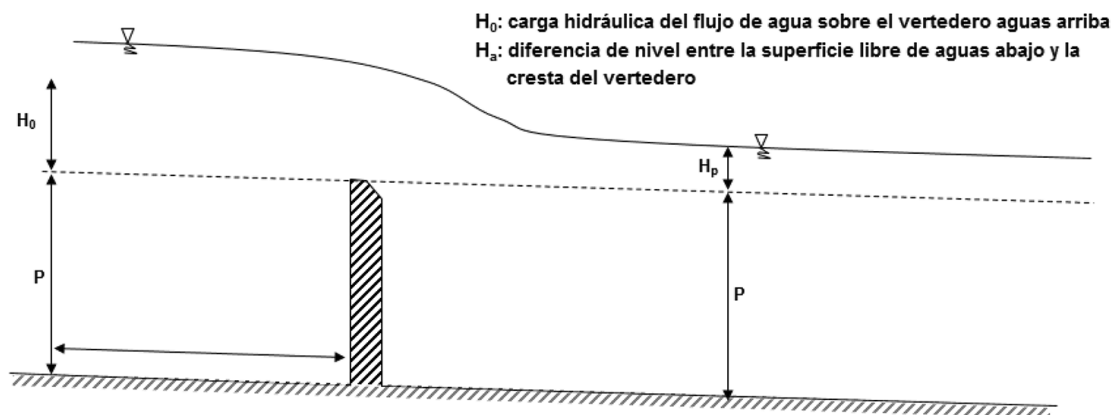


Figura N°8.- Representación del corte longitudinal de un vertedero sumergido o ahogado

Por lo que podemos $(P + H_d) < (P + H_u) \rightarrow H_d < H_u$

O también:

$$\frac{H_d}{H_u} < 1 \quad \text{ó} \quad (P + H_d) > P$$

Como norma general, se puede afirmar que las fórmulas utilizadas para calcular el caudal en un flujo sumergido son menos precisas que cuando el flujo está en estado libre.

1. Vertedero rectangular

Es muy usado a nivel predial, por su fácil construcción. La precisión de su lectura y, consecuentemente, la determinación del caudal (Q) tiene un margen de error que fluctúa entre 3 y 5%.

Para determinar el caudal que pasa por un vertedero rectangular, se puede utilizar la fórmula de Francis, cuando se trata de un vertedero rectangular con contracción lateral.

$$Q = 1.84 * (L - 0.2h) * H^{1.5}$$

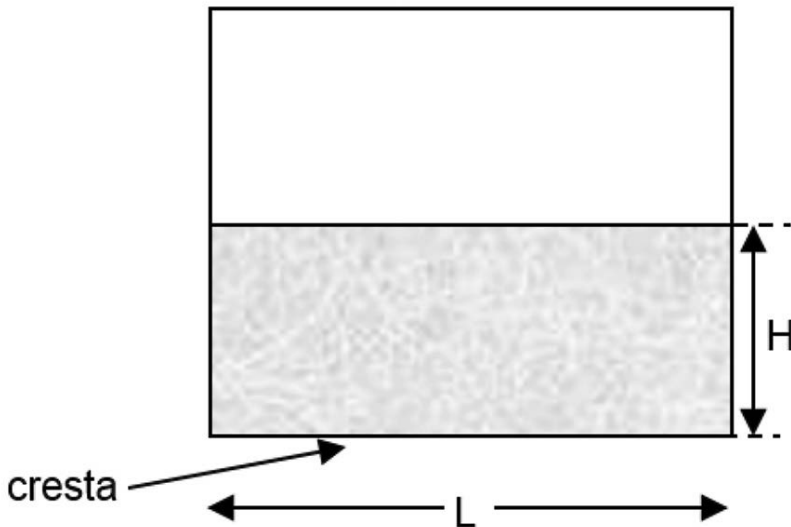


Figura N°9.- Representación de un vertedero rectangular

Donde:

Q = Caudal (m^3/s)

L = Ancho de la cresta del vertedero, (m), y

H = Altura o carga de agua que pasa sobre el vertedero, (m).

2. vertedero trapezoidal

El vertedero trapezoidal es conocido también como vertedero Cipolletti, en honor a su inventor. Para usar la fórmula propuesta, se requiere que $H < 3L$ y que el talud de sus lados sea 1:4 (horizontal - vertical); su construcción es dificultosa, motivo por el cual es menos utilizado, en relación a otras estructuras.

La ecuación más utilizada para el cálculo del caudal en flujo libre es la fórmula de Francis.

$$Q = 1.859 * L * H_u^{3/2}$$

Donde:

Q = Caudal (l/s)

L = Largo de la cresta (m)

H_u = carga de agua sobre la cresta del vertedero (cm)

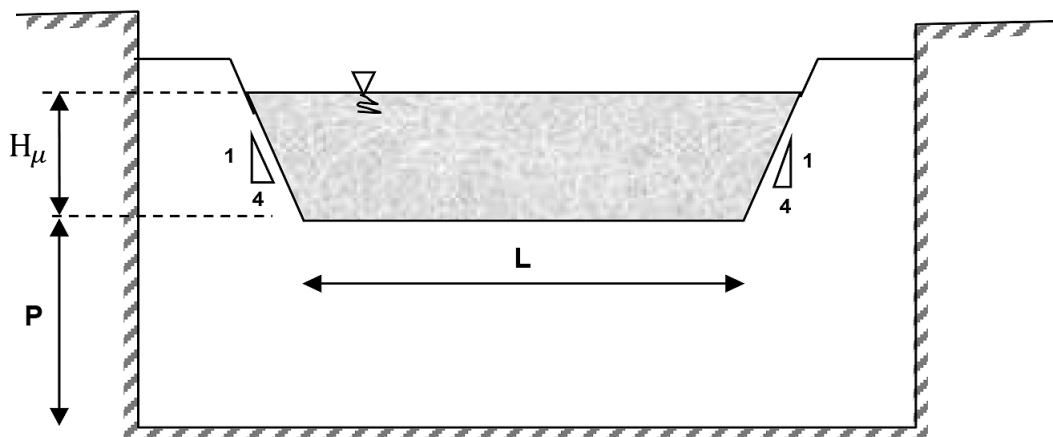


Figura N°10. Vista transversal de un vertedero trapecoidal

3. Vertedero triangular

El vertedero triangular más utilizado es aquel cuya escotadura forma un ángulo recto. Es decir, cuyo vértice inferior tiene forma de un ángulo de 90° . Su uso es recomendable especialmente para caudales pequeños, por donde pasan caudales menores de 110 litros por segundo, pues en estos niveles de caudal, la precisión de este tipo de vertedero es mayor que la de otros.

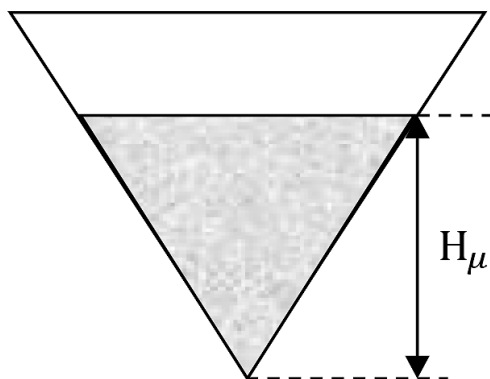


Figura N°11. Vista transversal de un vertedero triangular

La fórmula más utilizada para la determinación del cálculo es la ecuación:

$$Q = 1,342 H_u^{2.48}$$

O también la fórmula de King:

$$Q = 1,380 H_u^{2.5}$$

Donde:

Q = Caudal que pasa por el vertedero (l/s)

H_u = Tirante o carga de agua sobre el vertedero (m)

4. Vertedero Parshall

Es una de las estructuras más antiguas y usadas para la medición de caudales en canales abiertos. El material usado para su construcción puede ser madera, concreto o metal, según el tamaño el canal y caudal a medir.

El medidor Parshall tiene una alta precisión para la medición de caudales, y puede funcionar ya sea en condiciones de flujo libre como en sumergido. Es más preciso cuando opera en flujo libre. Además, su operación es relativamente más sencilla.

En el diseño de un aforador Parshall, se recomienda que el ancho de la garganta sea 1/3 a 1/4 del ancho del canal.

Un aforador Parshall consta de 3 partes: Canal de entrada, garganta y canal de salida.

El canal de entrada tiene sus paredes verticales y simétricas, y su plantilla de fondo es horizontal.

La garganta, tiene sus paredes verticales y paralelas, su plantilla de fondo posee una pendiente en la proporción de 2.67:1/5 (horizontal – vertical). El ancho de la garganta se le denota por **W**.

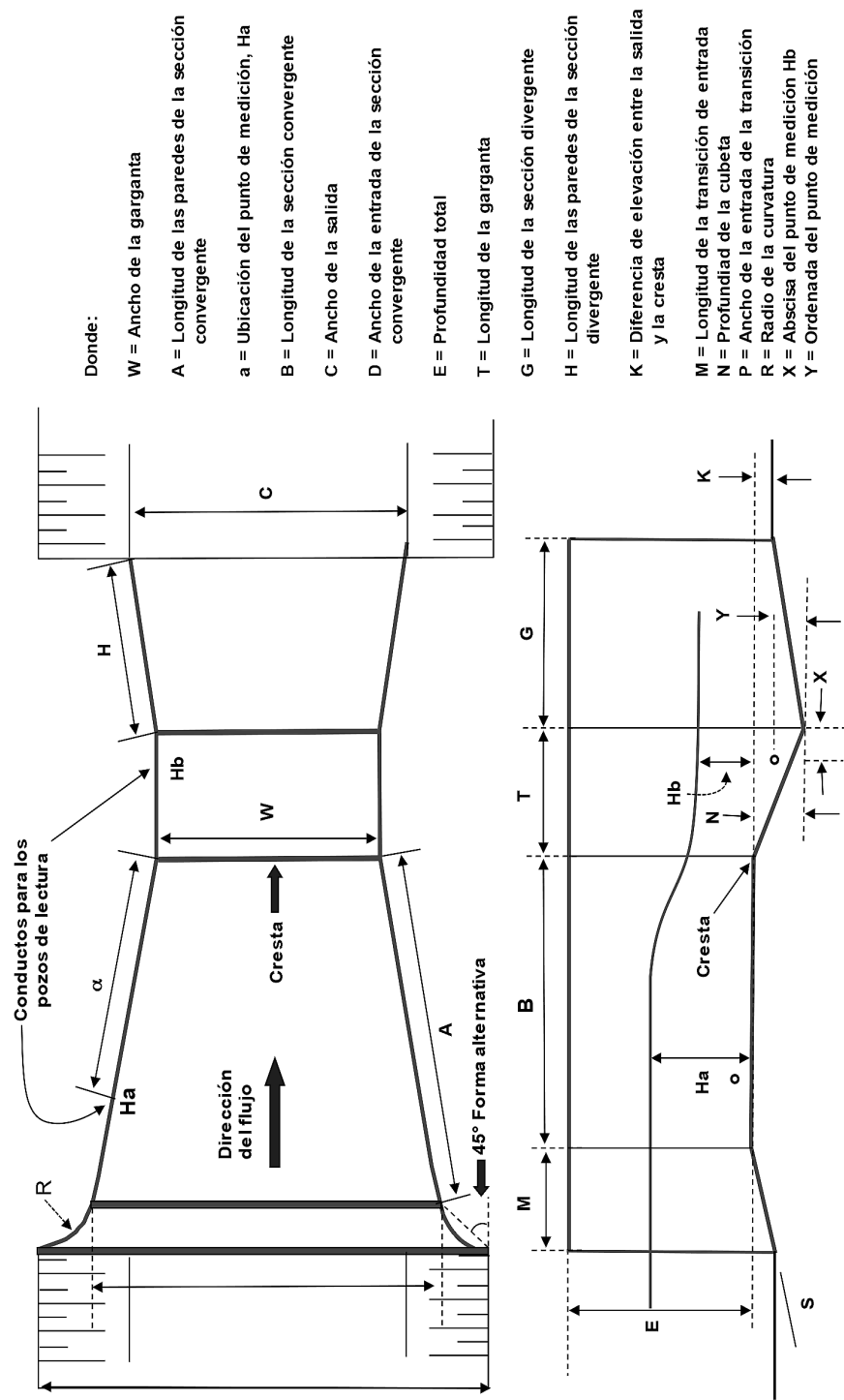


Figura N°12.- Características de un aforador Parshall

El canal de salida tiene sus paredes verticales y divergentes. El fondo de este canal posee una contra pendiente.

La determinación del caudal que pasa por el vertedero se efectúa ya sea analítica o gráficamente.

Analíticamente, se determina conociendo el ancho de la cresta de la garganta (W). Sobre esa base, se define la ecuación a ser usada y la lectura de la carga de agua que pasa. Para ello, se usa el cuadro siguiente.

Gráficamente, el caudal se determina mediante el uso de una curva de calibración que es elaborada para cada valor de W . En el eje de las X , va el valor de la carga o lámina de agua que pasa (h_u) y; en el eje Y , va el caudal correspondiente.

Donde:

Q = Caudal (l/s)

H_u = Carga aguas arriba de la garganta (m) Nota: no se recomienda el uso cuando el nivel de sumergencia es menor de 0.95.

Cuadro N°2.- Dimensiones estándar de los aforadores Parshall

W	A	a	B	C	D	E	T	G	K	M	N	P	R	X	Y
Dimensiones en mm															
25.4	363	242	356	93	167	229	76	203	19	---	29	---	---	8	13
50.8	414	276	406	135	214	254	114	254	22	---	43	---	---	16	25
76.2	467	311	457	178	259	457	152	305	25	---	57	---	---	25	38
152.4	621	414	610	394	397	610	305	610	76	305	114	902	406	51	76
228.6	879	587	864	381	575	762	305	457	76	305	114	1080	406	51	76
Dimensiones en mm															
0.3048	1.372	0.914	1.343	0.610	0.845	0.914	0.610	0.914	0.076	0.381	0.229	1.492	0.508	0.051	0.076
0.4572	1.448	0.965	1.419	0.762	1.026	0.914	0.610	0.914	0.076	0.381	0.229	1.676	0.508	0.051	0.076
0.6096	1.524	1.016	1.495	0.914	1.206	0.914	0.610	0.914	0.076	0.381	0.229	1.854	0.508	0.051	0.076
0.9144	1.676	1.118	1.645	1.219	1.572	0.914	0.610	0.914	0.076	0.381	0.229	2.222	0.508	0.051	0.076
1.2192	1.829	1.219	1.794	1.524	1.937	0.914	0.610	0.914	0.076	0.457	0.229	2.711	0.610	0.051	0.076
1.5240	1.981	1.321	1.943	1.829	2.302	0.914	0.610	0.914	0.076	0.457	0.229	3.080	0.610	0.051	0.076
1.8288	2.134	1.422	2.092	2.134	2.667	0.914	0.610	0.914	0.076	0.457	0.229	3.442	0.610	0.051	0.076
2.1336	2.286	1.524	2.242	2.438	3.032	0.914	0.610	0.914	0.076	0.457	0.229	3.810	0.610	0.051	0.076
3.0480	2.7432	1.829	4.267	3.658	4.756	0.914	0.610	0.914	0.076	0.457	0.229	4.172	0.610	0.051	0.076
3.6580	3.0480	2.032	4.877	4.470	5.607	1.524	0.914	2.438	0.152	---	0.343	---	---	0.305	0.229
4.5720	3.5052	2.337	7.620	5.588	7.620	1.829	1.219	3.048	0.229	---	0.457	---	---	0.305	0.229
6.0960	4.2672	2.845	7.620	7.315	9.144	2.134	1.829	3.658	0.305	---	0.686	---	---	0.305	0.229
7.6200	5.0292	3.353	7.620	8.941	10.668	2.134	1.829	3.962	0.305	---	0.686	---	---	0.305	0.229
9.1440	5.7912	3.861	7.925	10.566	12.313	2.134	1.829	4.267	0.305	---	0.686	---	---	0.305	0.229
12.1920	7.3152	4.877	8.230	13.818	15.481	2.134	1.829	4.877	0.305	---	0.686	---	---	0.305	0.229
15.2400	8.8392	5.893	8.230	17.272	18.529	2.134	1.829	6.096	0.305	---	0.686	---	---	0.305	0.229

Cuadro N°3.- Ecuaciones en aforadores Parshall según la dimensión de la garganta

Ancho de la garganta W (mm)	Ecuación del caudal Q (l/s) H_u	Nivel de sumergencia $S = \frac{h_a}{h_u}$
25.4	$Q = 60.4 h_u^{1.550}$	0.5
50.8	$Q = 120.7 h_u^{1.550}$	0.5
76.2	$Q = 177 h_u^{1.550}$	0.5
152.4	$Q = 381.2 h_u^{1.580}$	0.6
228.8	$Q = 535.4 h_u^{1.530}$	0.6
304.8	$Q = 690 h_u^{1.520}$	0.7
457.2	$Q = 1,056 h_u^{1.538}$	0.7
809.6	$Q = 1,428 h_u^{1.550}$	0.7
914.4	$Q = 2,184 h_u^{1.566}$	0.7
1,219.2	$Q = 2,953 h_u^{1.578}$	0.7
1,524.0	$Q = 3,732 h_u^{1.587}$	0.7
1,828.8	$Q = 4,579 h_u^{1.595}$	0.7
2,133.8	$Q = 5,312 h_u^{1.601}$	0.7
2,438.4	$Q = 6,112 h_u^{1.607}$	0.7
3,048.0	$Q = 7,480 h_u^{1.60}$	0.8
3,658.0	$Q = 8,860 h_u^{1.60}$	0.8
4,572.0	$Q = 10,960 h_u^{1.60}$	0.8
6,096.0	$Q = 14,540 h_u^{1.60}$	0.8
7,620.0	$Q = 17,940 h_u^{1.60}$	0.8
9,144.0	$Q = 21,440 h_u^{1.60}$	0.8
12,192.0	$Q = 28,430 h_u^{1.60}$	0.8
15,240.0	$Q = 35,410 h_u^{1.60}$	0.8

Tomado de Ackers (1978)

REFERENCIAS

1. AGRICULTURAL UNIVERSITY, DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING AND IRRIGATION (1979). "Introductory notes practical exercises Irrigation". Wageningen, The Netherlands. 20 pp.
2. AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS (1975). "Minimum requirements for design, installation and performance of sprinkler irrigation equipment. Agr. Eng. Yearbook. P. 509-511.
3. AYRES, y Westcott. 1979. Calidad del agua para la agricultura. Serie R y D. N° 20 bis. FAO. Roma.
4. AZCON, J. (2001). Fundamentos de Fisiología Vegetal. Ediciones Pirámide Madrid.
5. BARCELLÓ Coll, J. et al. (2001). Fisiología Vegetal. Ediciones Pirámide. Madrid.
6. BARCELÓ COLL, J.; NICOLAS RODRIGO, G.; SABATER GARCÍA, B.; SÁNCHEZ TAMÉS, R. (2003). Fisiología Vegetal. Ediciones Pirámide (Grupo Anaya S.A.) Madrid, España.
7. BAVER, L. D., Gardner W. H., Gardner, W. R. (1980). Física de Suelos. UTEHA. México.
8. BAVER, L. 1959. Soil Physics. Ed. J. Wiley & Sons. New York.
9. BERNARDO, S. 1995. Manual de Irrigación.
10. BOOTTER, L. J. (1974). El Riego Superficial. FAO – Roma.

11. BOOHER, LI. (1974). "El riego superficial". Cuadernos de Fomento Agropecuario de la FAO, N°95. Roma. 161 pp.
12. CORNEJO T., A. (1975). "El riego en el Perú". Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima Perú. 76 pp.
13. Doneen, L.D. and Westcot, D.W., (1984). Irrigation Practice and Water Management, FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), Irrigation and Drainage Paper 1 (Rey.), Rome, 63 p.
14. Doorenbos, J. and Rassam, A.H., (1979). Yield Response to Water, Irrigaúon and Drainage Paper, 33, FAO, Rome, Italy.
15. Doorembos, J. y Col. (1980). Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos. FAO, Roma.
16. Doorenbos, J. and Pruitt, W.O., (1977). Guidelines for Predicting Crop Water Requirements, FAO Irrigation and Drainage Paper 24, FAO. Rome, Italy 144 pp.
17. FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), (1978). Report on the Agroecological Zones Project. vol 1. Methodology and results for Africa, Rome, Italy.
18. FAO. 1993. Climulat for Cropwat. FAO Irrigation and Drainage Paper N° 49. Roma.
19. FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), (1995). Irrigation in Africa in figures. Rome, Italy, 336 pp.
20. FAO/UNESCO (1973). "Irrigation, drainage and salinity". Hutchinson & Co. Ltd., London. 510 pp.
21. Fuentes, J. L. (1996). Técnicas de Riego. Mundi – Prensa. Madrid.
22. Fuentes Yagüe, J. L. 1999. Técnicas de Riego. Ed. Mundi – Press. Madrid.
23. HAGAN, R.M., H.R. HAISE AND T.W. EDMINSTER (1967). Irrigation ofAgriculiural Lands. American Soc. of Agronomy, Madison, Wisconsin. 1180 pp.
24. Hansen, VE., Israelsen, OW. and Stringham, G.E. (1979). Irrigation Principies andPractices.John Wiley and Sons, Inc. New York. 417 pages.
25. Hargreaves, G.H. (1975). Moisture availability and crop production. Transactions

- ASAE 18(5): 980-984.
26. Hargreaves, G.H. (1983). Practical agroclimatic information system: 113-127 in D.F. Cusack (cd) Agroclimatic Information for Development — Reviving the Green Revolution, Westview Press, Inc., Boulder, Colorado.
 27. Hargreaves, G.H., (1990). Crop ET modeling, ASAE Paper 902517, Chicago.
 28. Hargreaves, G. H. y Merkle, G. P. (200). Fundamentos del Riego. Centro Internacional de Riego. Universidad Estatal de Utah, Logan. 221 pag.
 29. Hill, R.W., R.J. Hanks, and J.L. Wright. (1987). Crop yield models adapted to irrigation scheduling programs. Irrigation systems for the 21st century, MCE conference proceedings, Portland, OR July 28-30, pp. 699-706.
 30. <http://www.agua.org.mx/h2o/index>
 31. <http://www.aula21.net/nutriweb/agua.htm>
 32. IWMI. (1997). World Water and Climate Atlas for Agriculture. Int'l Water Management Institute (IWMI), P.O. Box 2075, Colombo, Sri Lanka
 33. Jensen, M.E., Burman, R.D., and Allen, R.G. eds. (1990). Evapotranspiration and irrigation water requirements, ASCE Manual 70, Amer. Soc. Of Civil Engrs., New York. 332 pages.
 34. Kay, M. 1986. Surface Irrigation. Systems and Practice. Cranfield Press. Cranfield. England.
 35. Losada, A. 1996. Riegos: Fundamentos Hidrológicos y Métodos de Aplicación. ETSI Agrónomos. Madrid.
 36. Marsh, A.W., (1981). Reprint, Questions and Answers about Tensiometers. University of California, Leaflet 2264, ANR Publications, Oakland.
 37. Marschner, H. (1995). Mineral Nutrition of higher plants. Academic Press. London.
 38. Merriam, J.L. and Keller, J. (1978). Farm Irrigation System Evaluation — A Guide for Management. Bio. & Irrig. Engrg. Dept., Utah State Univ., Logan, Utah. 271 pages.
 39. Pogue, W.R., (1990). WATERMARK Soil moisture sensor — An update. ASAE

Paper No. 902582, Chicago, Dec. 18-2L

40. SAPIR, E. (1975). "Furrow Irrigation". Extension Service, Ministry of Agriculture, Statu of Israel. 56 pp.
41. Samani, Z.A., Hargreaves G.H., Zuniga, E., and Keller, A.A., (1987). Estimating crop yield from simulated daily weather data, Applied Engineering in Agriculture. ASCE 3(2) 290-294.
42. Stegman, E.C., Musick, J.T., and Stewart, J.T., (1980). Problems and procedures in determining water supply requirements for irrigation projects. In: Irrigation of Agricultural Lands. R.M. Hagan (ed) Amer. Soc. Agron. Monograph 11, pp. 771-784.
43. Sumpsi Viñas, J. M. et al (1999). Economía y Gestión del agua en la agricultura. Coedición MAPA Mundi Prensa. Madrid.
44. The Economist. (2008). El futuro de la tecnología. Buenos Aires, The Economist- Colección Finanzas y negocios.
45. Thompson, L. M. Thoeh, F. R. (1980). Los suelos y su fertilidad. Reverté. Barcelona.
46. U.S.D.A. (1974). Border irrigation. Chapter 4, Section 15, S.C.S. National Engineering. Handbook. Washington.
47. Vásquez, V.A. y T.Chang-Navarro, L. (1992). El Piego, Principios Básicos. 160 pp.
48. Villalbi, I.; Vidal, M. (1988). Análisis de Suelos y Foliares. Interpretación y Fertilización. Fundación Caja de Pensiones. Barcelona.
49. Voisin, A. (1979). Leyes científicas en la aplicación de los abonos. Tecnos. Madrid.
50. Walker, W.R. and Skogerboe, G.V. (1986). Surface irrigation theory and practice. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, Newjersey. 386 pages.
51. Walker, W. R.; Skogerboe, C. V. (1987). Surface Irrigation. Theory and Practice. Prentice – Hall. New Jersey.

La presente publicación trata sobre los fundamentos básicos para el desarrollo del riego como práctica agronómica en los cultivos. El contenido del libro comprende los principales puntos:

Conceptos básicos y fundamentos científicos de la relación agua-suelo-planta; las necesidades de agua de los cultivos y sus respectivos cálculos; las eficiencias de riego; la calidad del agua de riego y problema aplicativos; diseño de sistemas de riego por gravedad tanto en surcos y melgas; desarrolla la teoría y fundamentación de la programación de riego en los cultivos; desarrolla toda la teoría y fundamentación sobre el valor económico del agua, su significado y determinación; la fertilización y la productividad de los cultivos y su cálculo de sus requerimientos; desarrollo sobre los conceptos de agua virtual y huella hídrica y el comercio virtual del agua; finalmente desarrollo de la medición del caudal de agua usada en el riego.

Toda esta información es básica para el manejo del agua en los cultivos y su uso eficiente de dicho recurso. Asimismo todo lo cual es base para la tecnificación de los sistemas de riego: Aspersión, micro aspersión, goteo o de exudación.

Siendo una de las especialidades importantes de nuestra Universidad la agronomía y la ingeniería agrícola, este libro será utilizado por los estudiantes de dichas especialidades y constituirá un aporte para todos los estudiantes y profesionales vinculados al tema.



Fondo Editorial
Universidad Nacional Agraria La Molina