

Las Relaciones Agua Suelo Planta Atmósfera En Planificación, Diseño y Manejo de Proyectos de Aguas y Tierras¹

Rafael M. Rojas, Ph.D²

1. Introducción.

Las Relaciones Agua-Suelo-Planta-Atmósfera (RASPA) revisten una gran importancia en riego, drenaje, hidrología y otras ciencias relacionadas con los recursos hídricos y el ambiente. La utilización de modelos de simulación en las ciencias agronómicas, forestales e hidrología, ha puesto en relieve lo anterior y en tal sentido los requerimientos de éstos han motivado que en la actualidad se haya renovado el interés por el tema. De la misma manera, el interés cada día más notorio por los temas ambientales, ha impuesto la necesidad de intensificar los estudios en esta materia.

El tema de las Relaciones Agua-Suelo-Planta-Atmósfera (RASPA) ha sido siempre de gran importancia en los estudios de riego y drenaje, sin embargo, en el campo de los recursos hídricos y ambientales y en especial la hidrología, aunque no ignorado, siempre ha sido relegado a un segundo plano y por lo general se ha recurrido a generalizaciones simplistas. En general la referencia a este tema se ha limitado a su inclusión en el ciclo hidrológico y en los balances hídricos. En éstos se mencionan variables y parámetros como: humedad del suelo, infiltración, evapotranspiración, percolación y otros, sin embargo no se enfatiza la importancia de los mismos.

1.1 Importancia del conocimiento de las relaciones agua-suelo-planta-atmósfera.

La importancia del tema puede enfocarse desde varios puntos de vista dependiendo de un interés particular y de la finalidad que se persigue. Por ejemplo para un estudio de abastecimiento de agua, las plantas pueden considerarse sólo como consumidoras de agua y protectoras contra la erosión y los suelos como un sistema de almacenamiento. Por otro lado, para la producción vegetal es necesario conocer todas las relaciones. Para el ambientalista este conocimiento debe ser mayor puesto que es necesario considerar la conservación del ambiente en general y en ese sentido se debe incluir los aspectos de fauna y calidad de vida para los seres humanos.

La vegetación constituye el principal factor de vida en la tierra pues es el mayor transformador de sustancias que existe y es el principal elemento de la cadena alimentaria del planeta; sin vegetación no puede existir otro tipo de vida sobre la tierra y ésta depende del agua, el suelo y la atmósfera. El agua constituye más del 70% de las plantas, el suelo le sirve de sustento y proveedor de nutrientes y la atmósfera controla en suministro de agua, energía,

¹ Este documento está redactado para ser entendido por personas no especialistas en suelo.

² Profesor Visitante. Centro de Estudios Forestales y Ambientales de Postgrado, ULA, Mérida.

oxígeno, nitrógeno y CO₂. El agua constituye la mayor superficie del planeta, sin embargo, su distribución espacial y temporal es tan irregular que genera grandes contrastes tales como desiertos y zonas anegadizas. Por otra parte, la distribución de los suelos y calidad de los mismos implica que muchas veces aún con disponibilidad de fuentes de agua no es posible su utilización.

En la actualidad se han popularizado los temas de “impactos ambientales” y “desarrollo sostenible” lo cual implica que en la planificación del desarrollo de los recursos naturales y en especial de la producción vegetal, es necesario tomar muy en cuenta el tema en cuestión para no repetir errores del pasado. Por otra parte, la gran diversidad de métodos de riego y la necesidad de ser más eficiente en el uso del agua, ha incrementado el interés por el conocimiento sobre temas relacionados con la capacidad de retención de humedad de los suelos, la infiltración y uso del agua por las plantas.

En la literatura mundial existen muchas referencias sobre proyectos de desarrollo agrícola que han fracasado o que no han sido exitosos por no haber realizado esfuerzos por conocer las realidades de las relaciones agua suelo planta atmósfera. Para citar algunos casos ocurridos en Venezuela, se pueden mencionar los proyectos de riego de los Llanos Occidentales, El sistema de riego del Guárico y la Isla Guara. Los errores cometidos en esos proyectos fueron producto de la falta de equipos multidisciplinarios que estudiaran la problemática y al peso que tenían las obras civiles sobre el resto de los estudios. Por otra parte, esos proyectos fueron realizados en una época en la cual existían pocos técnicos especialistas en la materia y los profesionales extranjeros que trabajaron en los mismos no tenían mucha experiencia en el trópico.

En el caso del **sistema de riego del Guárico**, no se realizaron estudios de suelo y se planificó un sistema convencional para regar varios cultivos. El resultado fue que los suelos resultaron ser pesados con uso sólo para pasto y arroz; debido a ello, se optó por regar arroz cuyos requerimientos de agua son el doble de otros cultivos anuales y en consecuencia, un sistema que fue diseñado para regar 60.000 has, sólo puede regar 30.000 has. Como impacto negativo se tiene que para regar esas 30.000 has, se inundaron 26.000 has, de mejores suelos, que son las que ocupa el espejo de agua del embalse. Hoy día, ningún organismo financiero internacional aprobaría tal proyecto.

En los **Llanos Occidentales** fueron construidos varios sistemas de riego: San Carlos, Majaguas, Guanare, Boconó y Santo Domingo. En la mayoría de ellos, luego de los primeros problemas y después de estudios más detallados se determinó que el principal problema era el drenaje y no el riego, siendo la necesidad de éste, sólo complementaria. A consecuencia de lo anterior, los agricultores asentados no sintieron la necesidad del riego y sembraban en seco siendo perjudicados por los problemas de drenaje.

El peor de los casos lo constituye el proyecto de control de inundaciones de la **Isla Guara**, en el Delta del Orinoco. El proyecto tenía como finalidad el saneamiento de unas 100.000 has de suelos supuestamente de alta fertilidad. El proyecto fue realizado y en los primeros intentos de utilización de las tierras se detectó un grave problema con los suelos. Los suelos eran orgánicos de los llamados “cat clay” o suelos sulfato ácidos, los cuales al ser drenados se tornan irreversiblemente impermeables y pueden estar sujetos a incendios causados

por el alto contenido de azufre generado. En ese proyecto no sólo se perdió la inversión, sino que se causó un grave daño ambiental.

1.2 Estado del arte de los estudios.

La importancia del tema, la necesidad de contar con información en la planificación y manejo de los recursos naturales, el avance de las técnicas de computación, el desarrollo de diversos modelos de simulación, la popularización de los sistemas de información geográficos (GIS) y la existencia de numerosos satélites que transmiten información continuamente, ha incentivado el interés de la comunidad científica en la utilización de esos recursos para presentar información geográfica con variables tales como la evapotranspiración y la humedad del suelo. Esa información es útil para la estimación de cosechas, manejo de riego, estudio de la influencia del recalentamiento de la tierra y predecir riesgos de incendios forestales. La figura 1.2.1 muestra un mapa de Sudamérica con información de humedad del suelo y la figura 1.2.2 presenta información de humedad del suelo para el estado de Florida. La figura 1.2.3 muestra un mapa de evapotranspiración para el cultivo de caña de azúcar.

Como consecuencia de lo expresado anteriormente, se ha incrementado el desarrollo de equipos de medición de variables ambientales, los cuales sirven de apoyo para los estudios geográficos especiales.

Figura 1.2.1 Índices de Humedad del Suelo

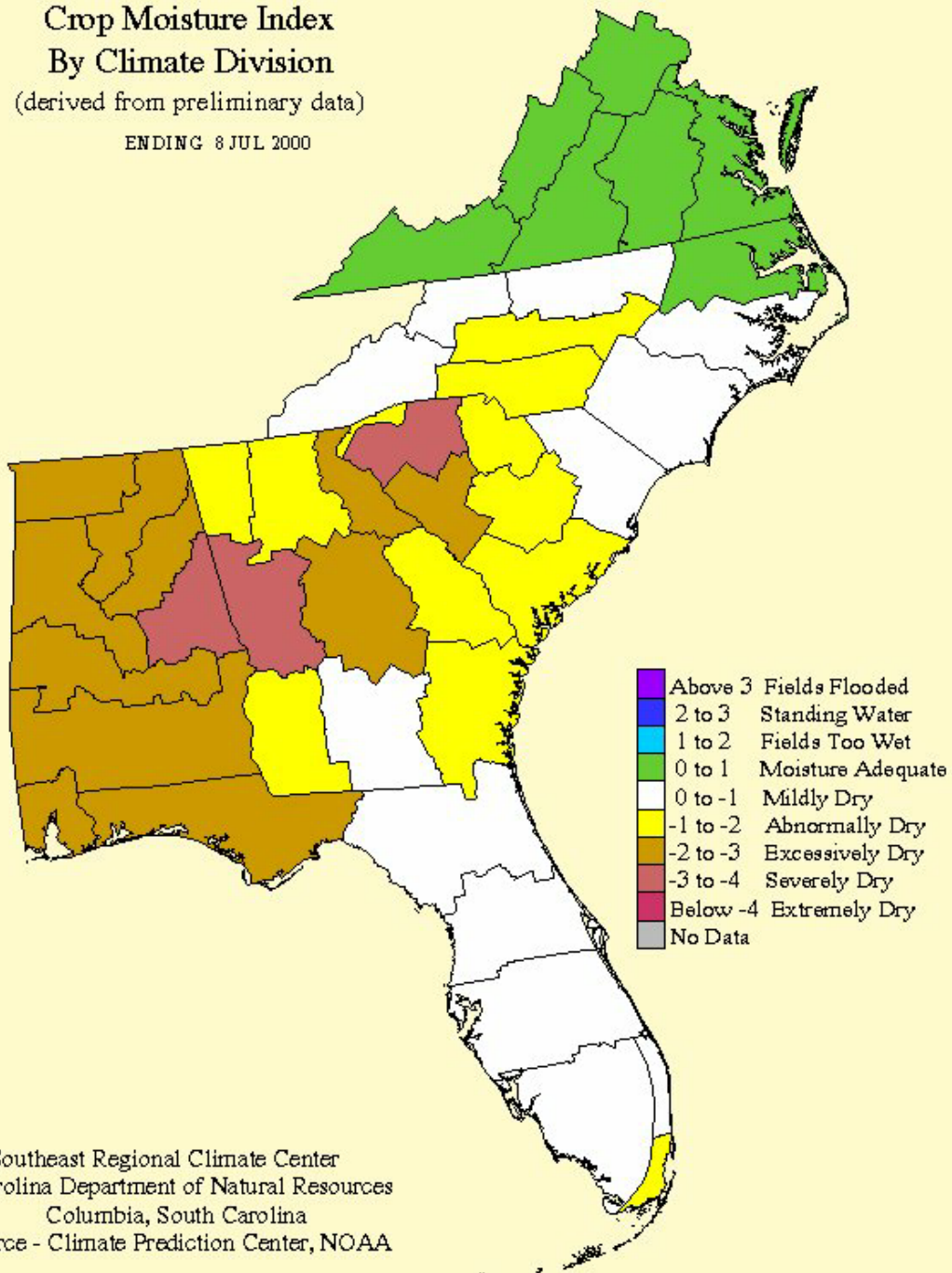


Figura 1.2.2 Índice de Humedad de los cultivos

Crop Moisture Index By Climate Division

(derived from preliminary data)

ENDING 8 JUL 2000



Southeast Regional Climate Center
South Carolina Department of Natural Resources
Columbia, South Carolina
Data Source - Climate Prediction Center, NOAA

11 Jul 00 08:07:08 Tuesday

Figura 1.2.3 Estimación de la evapotranspiración de la caña de azúcar.



1.3 El análisis de las relaciones agua suelo planta atmósfera.

Dada la complejidad del tema y conociendo que esas relaciones ocurren simultáneamente, es muy difícil realizar un análisis que incluya todos los factores. Tradicionalmente el análisis se realiza considerando pares de componentes y luego se integran todos, por lo general utilizando modelos de simulación. Siguiendo lo tradicional se hará un análisis de las relaciones: agua-suelo, suelo-planta, suelo-atmósfera, agua-planta y planta-atmósfera.

A manera de ejemplo y para iniciar la discusión, se analizará la ecuación básica del balance hídrico en el complejo suelo-cobertura:

$$\text{Entradas} = \text{Salidas} \pm \text{Cambios de almacenamiento}$$

O su equivalente:

$$P = Q + E_t + \Delta \text{Alm} \quad (1)$$

En la cual las entradas al complejo están representadas por la precipitación, **P**. Las salidas están integradas por la escorrentía, **Q**, y la evapotranspiración, **E_t**. Los cambios de almacenamiento se representan por **ΔAlm**. Puede notarse que todas las salidas dependen de factores y variables relacionadas con el suelo, la atmósfera y las plantas. La escorrentía depende de factores fisiográficos relacionados con suelos y plantas. La evapotranspiración depende de las plantas, el suelo, el clima y la disponibilidad de agua. Finalmente, la cantidad y cambios de almacenamiento, dependerán de las características de retención de humedad de los suelos.

El cuadro 1.3.1 muestra algunos parámetros y variables relacionadas con agua, suelos y plantas con sus respectivas influencias. De la misma manera, la figura 1.3.1 muestra, en mayor detalle, las relaciones anteriores.

Cuadro 1.3.1. Algunas Relaciones entre Variables y Parámetros en el Balance Hídrico y Erosión

Variable o Parámetro	Influencia sobre					
	Escor rentía	Evapotr anspirac ión	Agua subterr ánea	Almacena miento	Erosión	Agua en el Suelo
Textura	x		x	x	x	x
Estructura	x		x	x	x	x
Caract . químicas		x	x	x		
Retención Humedad	x	x	x	x	x	x
Albedo		x				
Infiltración	x				x	x
Permeabilidad	x		x			x
Percolación	x		x	x		x
Cobertura(plantas)	x	x	x	x	x	x
Clima	x	x	x	x	x	x

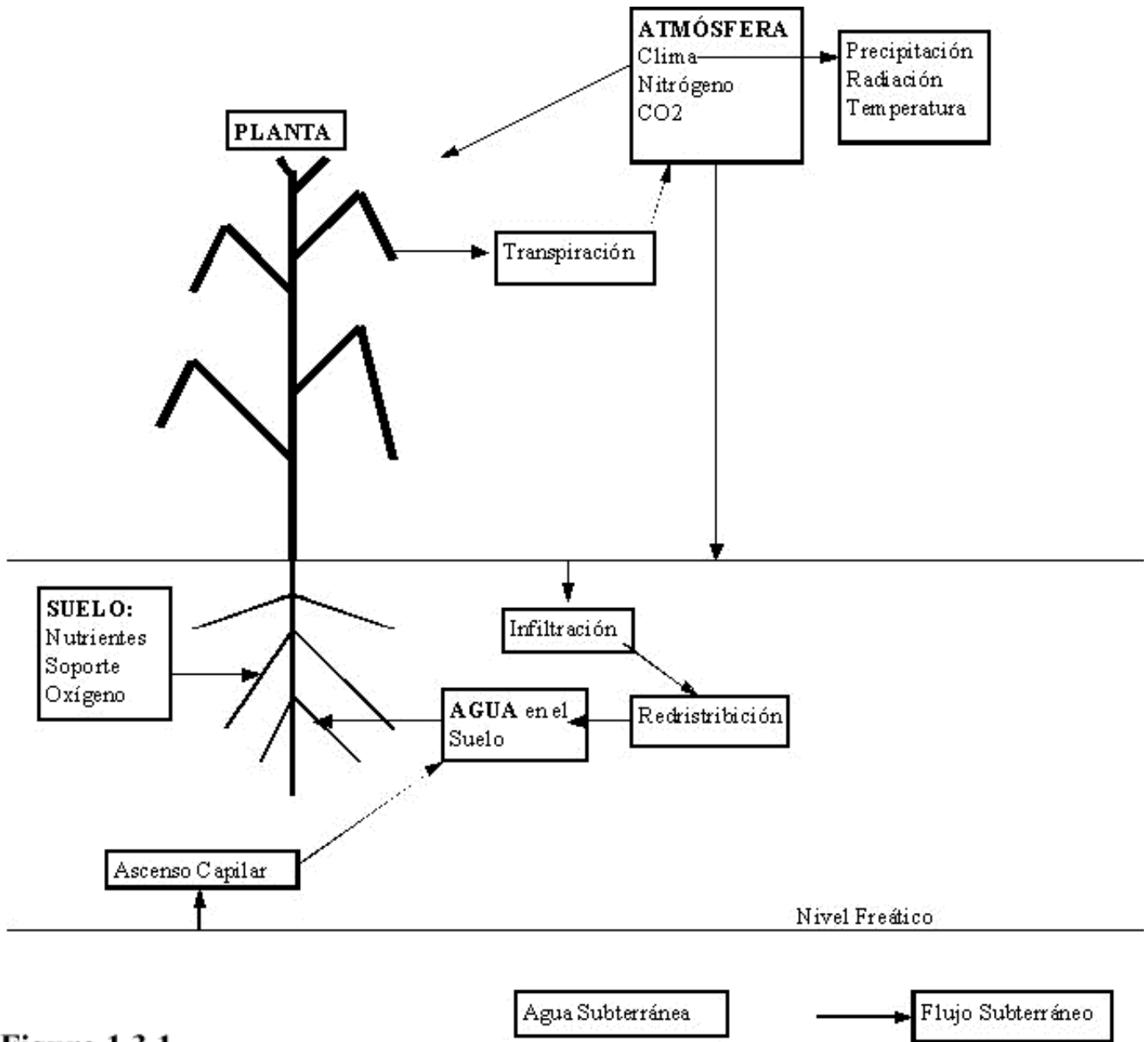


Figura 1.3.1

RELACIONES AGUA-SUELO-PLANTA-ATMOSFERA

1.4 Alcance del documento.

El presente documento constituye una guía para el estudio de las relaciones suelo agua planta atmósfera (RASPA) para aquellas personas que no son especialistas en suelos y por consiguiente se obvian los aspectos muy teóricos. Se pretende abarcar la mayoría de las aplicaciones del tema a fin de enfatizar el uso multidisciplinario del mismo. Aunque se tratarán todos los aspectos de las relaciones agua-suelo-planta-atmósfera, en los aspectos suelo-planta, sólo se tratarán aquellos temas relacionados con el agua.

2. Relaciones Suelo – Agua

Las relaciones más importantes son: a) capacidad de retención de humedad; b) infiltración; c) redistribución; d) ascenso capilar; e) conductividad hidráulica y f) curvas de drenaje de los suelos. El estudio y análisis de esas relaciones requiere de un conocimiento profundo de Física de Suelos, en especial de los “potenciales de agua en el suelo”. Como el objetivo de esta publicación no es el estudio de los principios teóricos, se tratará de explicar la importancia de esas relaciones de una manera sencilla y sobre todo aplicada.

La **retención de humedad** se refiere a la capacidad que tienen los suelos de retener humedad. Esta propiedad de los suelos depende de varios factores entre los cuales se destacan: la textura, la densidad aparente, los coloides del suelo y la materia orgánica. Durante periodos relativamente cortos, esa característica es constante, sin embargo, el manejo de los suelos puede cambiarla en sentido positivo o negativo. Por ejemplo, la adición de materia orgánica mejora la retención; por el contrario, la compactación de los suelos la disminuye.

La **infiltración** se refiere al paso del agua desde la superficie del terreno hacia el perfil del suelo. La tasa de infiltración depende de varios factores fijos tales como: a) textura del suelo, b) estratificación del suelo, c) materia orgánica, d) cobertura y de factores circunstanciales tales como contenido de humedad del suelo y forma de aplicación del agua. Hay otros factores modificadores como: compactación, salinidad, encostramiento, etc., que limitan la entrada de agua.

La **redistribución** es el proceso mediante el cual el agua se mueve en el suelo de acuerdo a los “potenciales del agua” del mismo. De esa manera, ésta se mueve desde sitios de mayor contenido de humedad (potencial) hacia otros de menor potencial.

El **ascenso capilar** es el movimiento del agua desde el nivel freático por efecto de la capilaridad de los suelos. El ascenso capilar depende de la textura y composición de los suelos y de los gradientes de humedad existentes. El ascenso capilar puede alcanzar alturas mayores de un metro.

La **conductividad hidráulica** puede definirse como la capacidad de transmisión de agua de los suelos, esta puede ser saturada o no saturada. En la práctica sólo se usa la conductividad hidráulica saturada, comúnmente llamada permeabilidad. Esta propiedad de los suelos depende en gran parte de la textura de los suelos.

La **curva de drenaje de los suelos** indica la forma mediante la cual el suelo pierde agua por efecto de la gravedad.

2.1 Capacidad de Retención de humedad.

Los suelos pueden retener humedad de acuerdo a sus características físicas. El agua en el suelo es retenida principalmente por los fenómenos de cohesión y adhesión. En el suelo las partículas del mismo retienen el agua de acuerdo al área de las mismas. La fuerza con que las

partículas retienen el agua es conocida como **potencial mátrico del agua en el suelo**. El término retención de humedad está íntimamente ligado a la disponibilidad de agua para las plantas. Existen tres puntos característicos de humedad en el suelo: a) humedad de saturación; b) capacidad de campo y c) punto de marchitez permanente.

2.1.1. Puntos característicos de la humedad del suelo.

La **humedad de saturación, HSS**, es el contenido de humedad cuando el suelo está saturado y en cuyo caso el potencial de agua del suelo es cero. Esa es la máxima capacidad de retención de humedad. Esta característica es utilizada en los estudios de agua subterránea y drenaje. La saturación depende de la textura y densidad aparente del suelo y especialmente de la porosidad del mismo. En la práctica, se considera igual a la porosidad.

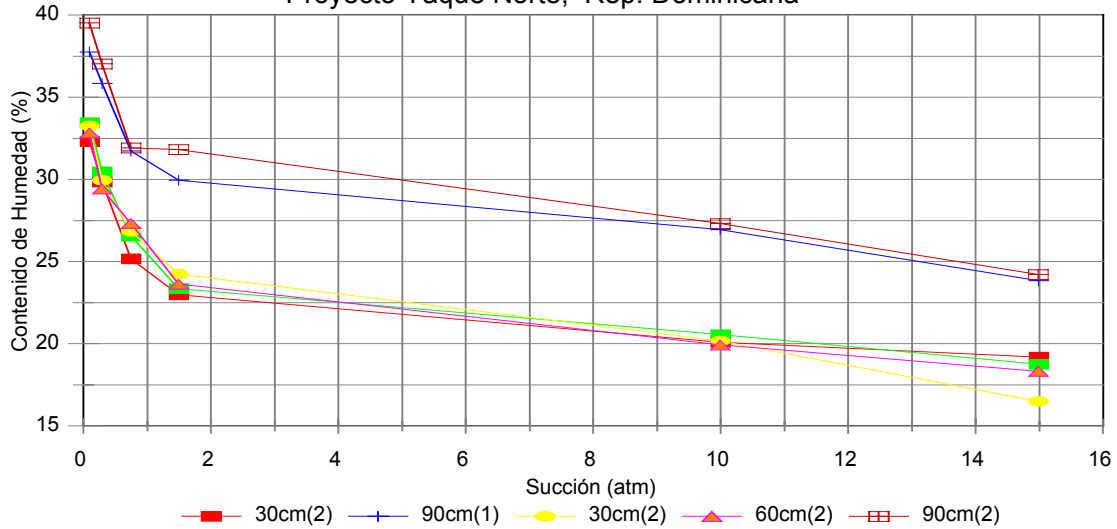
La **capacidad de campo, CC**, es el contenido máximo de humedad del suelo en condiciones de buen drenaje. En otras palabras es el contenido de humedad de un suelo, previamente saturado, luego de la acción de la gravedad. La capacidad de campo puede ser determinada en el campo o en el laboratorio. Para determinarla en el campo se requiere inundar el suelo y luego determinar el contenido de humedad a varios intervalos de tiempo hasta que el contenido de humedad se torne casi constante, lo cual ocurre al cabo de unas 48 horas. La capacidad de campo determinada en el laboratorio es aquella que corresponde a una succión (tensión) de 0.33 atmósferas.

El **punto de marchitez permanente, PMP**, representa el contenido de humedad del suelo en el cual las plantas se marchitan permanentemente. Al igual que las otras características, depende altamente de la textura del suelo. La determinación del punto de marchitez permanente se determina en el laboratorio y se corresponde con el contenido de humedad a una succión (tensión) de 15 atmósferas.

La humedad entre saturación y la capacidad de campo se denomina **agua drenable o porosidad drenable** y la humedad entre capacidad de campo y punto de marchitez permanente se denomina **agua útil o agua aprovechable**. El **agua disponible** es aquella que pueden utilizar las plantas, correspondiendo a la diferencia entre la humedad actual y el punto de marchitez permanente. Esos términos son muy utilizados en riego y drenaje.

En estudios detallados de retención de humedad, se determina la humedad a diferentes tensiones entre saturación y punto de marchitez y luego se confecciona una curva de valores de tensión versus humedad del suelo. Esa curva se denomina **curva característica de retención de humedad** y es utilizada para varios fines tales como programación de riego y en modelos de simulación. La figura 2.1.1 muestra esas curvas para dos suelos y diferentes profundidades.

Fig. 2.1.1 Curva Característica
 Proyecto Yaque Norte, Rep. Dominicana



2.1.2. La humedad del suelo.

El contenido de agua de un suelo en un momento dado se denomina la humedad del suelo y puede expresarse de varias formas: a) contenido en base a peso, b) contenido en base a volumen y c) contenido como lámina de agua.

a) Contenido de humedad en base a peso seco.

El contenido de humedad en base a peso, es la forma típica de expresar el contenido de agua de un suelo. Para su determinación se toman muestras de suelo, se pesan y luego se secan en una estufa a temperatura de 105 °C durante 24 horas. Las muestras secas se pesan de nuevo para obtener el peso seco. El contenido de humedad será:

$$HS = \frac{Peso\ húmedo - Peso\ seco}{Peso\ seco} = \frac{Pa}{Ps} \quad (2.1.1)$$

En donde **HS** es la humedad del suelo y **Pa** y **Ps** son los pesos del agua y del suelo respectivamente. El resultado de HS puede expresarse como una fracción o en porcentaje. Esta metodología se denomina el método gravimétrico de determinación de la humedad del suelo. La humedad del suelo se puede determinar por métodos indirectos tal como se explica en el anexo A.

b) Contenido de humedad en base a volumen.

Otra manera de expresar la humedad del suelo es como un volumen. Esto se basa en la consideración de que el agua en el suelo ocupa un volumen del mismo. La figura 2.1.2 presenta un esquema de la conceptualización del volumen de agua en un suelo. Puede observarse que el

perfil del suelo se considera como un cubo en el cual se presentan los tres componentes principales del suelo: el aire, el agua y el suelo en sí. El espacio ocupado por el agua y el aire es el **espacio poroso** o porosidad. Una muestra de suelo tomada en el campo contiene esos tres componentes; al determinar la cantidad de agua en base a peso, no se puede determinar qué volumen del suelo es ocupada por el agua. Al analizar la figura antes mencionada se puede observar que la humedad de suelo en base a volumen está representada por **d** y la profundidad del suelo por **D**.

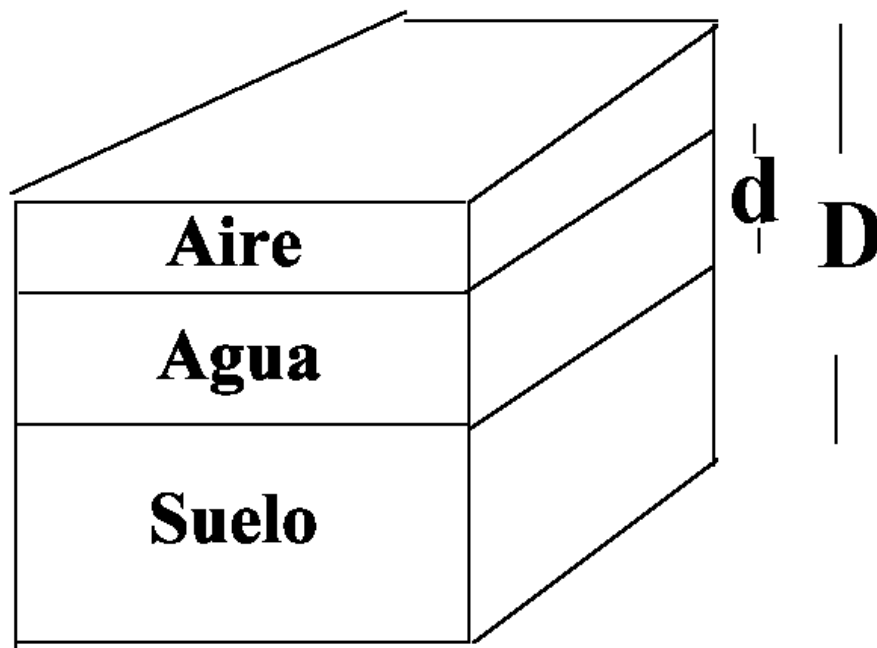


Figura 2.1.2 El concepto de humedad del suelo en base a volumen

Si se considera que el cubo es unitario y por tanto $D=1$, entonces el contenido de agua en base a volumen será:

$$\theta = d/D \quad (2.1.2)$$

En donde θ es el contenido de humedad en base a volumen, como fracción, **d** es el volumen de agua en el suelo y **D** es la profundidad del suelo. Como la densidad aparente del suelo, ρ_s , se expresa en g/cm^3 , al dividir el peso entre la densidad se obtiene el volumen y en consecuencia se puede escribir la ecuación (2.2) de otra manera:

$$\theta = \frac{d}{D} = \frac{\frac{Pa}{\rho_s}}{\frac{Ps}{\rho_w}} = \frac{Pa}{Ps} \times \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad (2.1.3)$$

en donde θ es la humedad del suelo en base a volumen, \mathbf{Pa} y \mathbf{Ps} son los pesos del agua y el suelo respectivamente y ρ_w y ρ_s son las densidades del agua y el suelo respectivamente. Como $HS = Pa/Ps$ (Ec, 2.1.1) , la densidad del agua es igual a 1 y la densidad del suelo es igual a la densidad aparente del mismo, ρ_a , entonces:

$$\theta = HS \times \rho_a \quad (2.1.4)$$

en donde la humedad del suelo en base a volumen es expresada como una fracción y en consecuencia la densidad aparente se expresa como adimensional. Grassi (1991) presenta otro manera de llegar a la ecuación (2.1.4).

c) Contenido de humedad expresado en forma de volumen o lámina.

Para fines prácticos, la humedad del suelo debe ser expresada en unidades reales. Combinando las ecuaciones (2.1.3) y (2.1.4) se obtiene:

$$d_L = HS \times \rho_a \times D \quad (2.1.5)$$

en donde d_L es la lámina de agua en el suelo y D es la profundidad del mismo. Las unidades de d_L dependerán de las unidades de D . En riego, drenaje e hidrología la unidad más común es el milímetro, mm, por ser ésta la misma utilizada para la precipitación y evaporación. La lámina también puede ser expresada como fracción en la forma de cm/cm, o sea centímetros de agua por centímetro de profundidad del suelo. La unidad de milímetros tiene la ventaja adicional por ser equivalente a un litro por metro cuadrado (l/m^2).

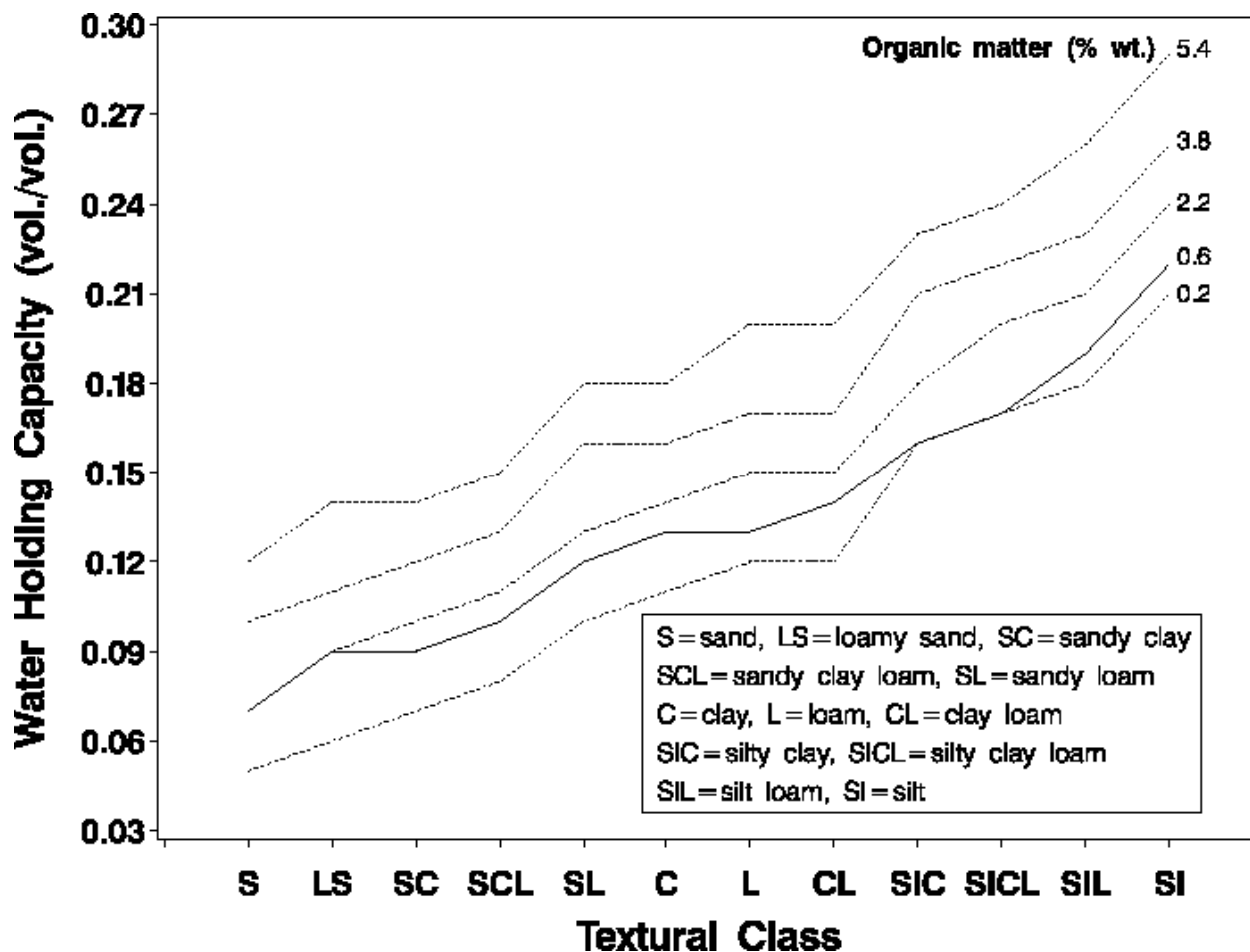
2.1.3 Determinación de las características de retención de humedad.

En estudios de suelo con fines de riego, drenaje e hidrología, sólo se determina la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente. Estos representan sólo dos puntos de la curva de retención de humedad del suelo. La curva característica de retención de humedad de los suelos sólo se usa para estudios especiales. En el anexo A se presentan métodos para realizar esas determinaciones.

Es necesario enfatizar que para poder realizar estudios detallados para proyectos de desarrollo y en el manejo de proyectos de riego y drenaje es necesario realizar esas determinaciones. El costo de los análisis requeridos es tan reducido, en comparación con las inversiones, que sería irresponsable no hacerlo.

En el caso de estudios preliminares en proyectos de desarrollo de aguas y tierras, pueden realizarse estimaciones basadas en parámetros físicos de los suelos. Para ello es necesario tener información sobre textura, densidad aparente y materia orgánica de los suelos. Con esa información se pueden utilizar metodologías de estimación de los mencionados parámetros. Kern (1995) analizó varias metodologías utilizando información de unos 6000 pedones concluyendo que el modelo de Rawls (1982) era el más adecuado para ello. Con anterioridad Saxton y otros (1985) habían llegado a las mismas conclusiones con un estudio similar que abarcaba mas de 200 suelos. Motivado a lo anterior se utilizará el modelo de Rawls (1982) para tal fin. En el anexo B se detallan los métodos. El cuadro 2.1.1 y la figura 2.1.3 muestran valores promedio para las diferentes clases texturales.

Figura 2.1.3 Variación de la retención de humedad con la textura del suelo y la materia orgánica.



Cuadro 2.1.1										
Características de las Clases Texturales de Suelos**										
Clase Textural		Da	Granulometría			Porosidad		Retención H ₂ O		Kc
			arena	arcilla	limo	total	efectiva	CC	PMP	
Arena	a	1.62	88	5	7	0.44	0.42	0.09	0.03	21
Areno francoso	aF	1.64	83	13	4	0.44	0.40	0.13	0.06	6.11
Franco arenoso	Fa	1.55	62	8	30	0.45	0.41	0.21	0.10	2.59
Franco	F	1.26	51	15	34	0.46	0.43	0.27	0.12	1.32
Franco limoso	FL	1.31	17	13	70	0.50	0.49	0.33	0.13	0.68
Franco arcillo arenoso	FAa	1.64	58	28	14	0.40	0.33	0.26	0.15	0.43
Franco arcilloso	FA	1.34	33	34	33	0.46	0.39	0.32	0.20	0.23
Franco arcillo limoso	FAL	1.3	10	34	56	0.47	0.43	0.37	0.21	0.15
Arcillo arenoso	Aa	1.4	55	45	0	0.43	0.32	0.34	0.24	0.12
Arcillo limoso	AL	1.3	10	45	45	0.48	0.42	0.39	0.25	0.09
Arcilloso	A	1.22	10	70	20	0.48	0.39	0.40	0.27	0.06
** Adaptado de varias fuentes										

2.1.4 Medición de la humedad del suelo.

La humedad del suelo es una variable y como tal no se puede medir continuamente, a no ser por intermedio de aparatos registradores. En la práctica la humedad del suelo se mide con la finalidad de obtener información para aplicaciones tales como: controlar el riego, calibración de modelos de simulación, controlar experimentos agrícolas, estimar la evapotranspiración, etc. Existen varios métodos de medición y estimación de la humedad; entre ellos se pueden mencionar: a) método gravimétrico, b) tensiómetros, c) bloques de resistencia, d) sonda de neutrones, e) TDR, f) sensores de conductividad del suelo.

El **método gravimétrico** es único método directo de medir la humedad del suelo, el resto de los métodos deben ser calibrados con mediciones gravimétricas. Los **tensiómetros** miden la tensión del agua en el suelo y deben ser utilizados conjuntamente con la curva característica. Los **bloques de resistencia** estiman la humedad en base a la resistencia del suelo a conducir agua. La **sonda de neutrones** estima la humedad en base a volumen correlacionándola con la atenuación de neutrones por el agua. El **TDR** (Time Domain Reflectometer) se basa en la reflectancia de ondas por causa de la humedad. Los sensores de conductividad, son similares a los bloques, pero en vez de medir resistencia, miden conductividad. En el Anexo A se detallan los métodos más conocidos. Las figuras 2.1.4 , 2.1.5 y 2.1.6 muestran varios aparatos para medir humedad.

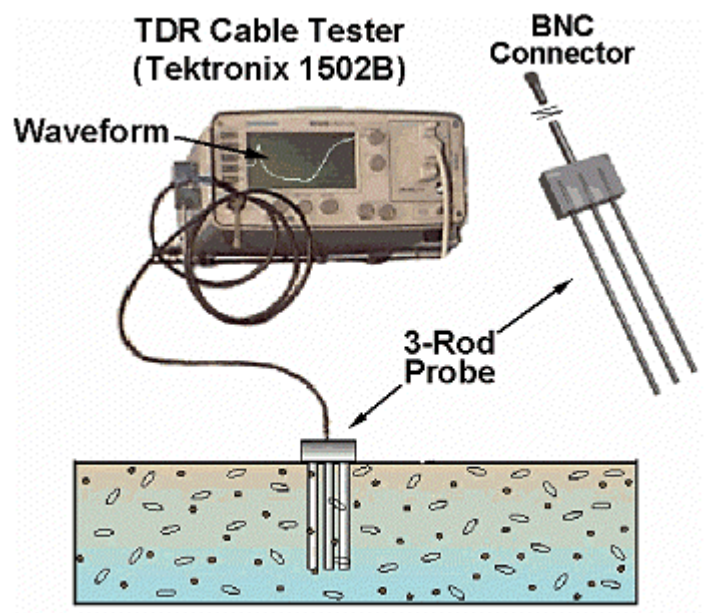
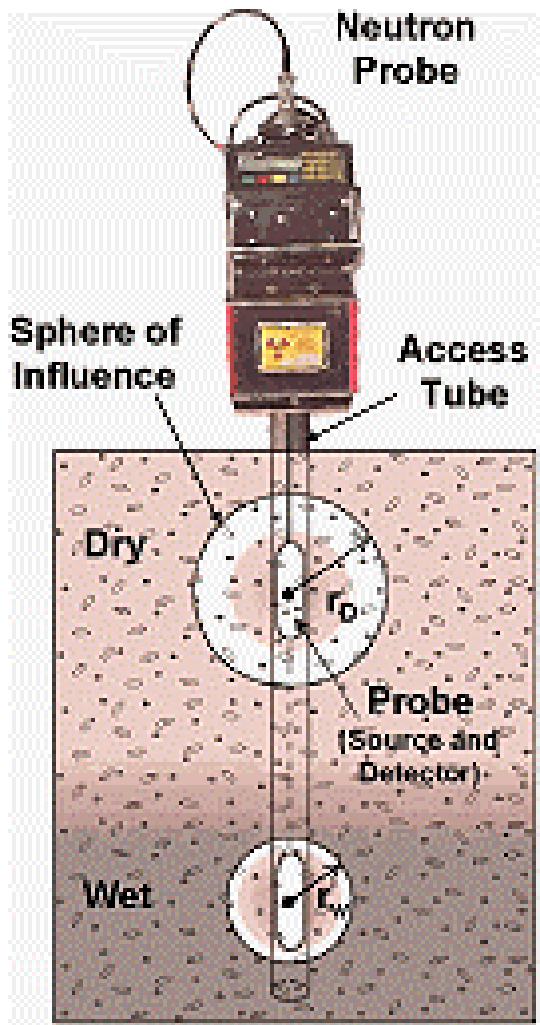


Fig. 1-9: Diagram of a TDR cable tester.



2.2 Potenciales del agua en el suelo

El agua en el suelo está sujeta a varios potenciales que condicionan la retención de la misma por el suelo y su movimiento. Los potenciales más importantes son: a) potencial mátrico, o de succión; b) potencial gravitacional y c) potencial osmótico.

El **potencial mátrico**, como ya fue mencionado es el potencial de retención por la matriz del suelo. El **potencial gravitacional** se refiere al potencial de la gravedad y se refiere a un cierto plano de referencia. El potencial osmótico o potencial de solutos, se refiere a la fuerza con que las sales retienen al agua. El potencial total del agua en un punto, será la suma de todos los potenciales.

2.3 Movimiento del agua en el suelo

El agua en el suelo es muy dinámica y se mueve de acuerdo a los potenciales de agua en el suelo. De esa manera, el agua se mueve desde un punto de mayor potencial hacia el de menor potencial. Por ejemplo, durante la infiltración, un punto por debajo de la superficie tiene un potencial mátrico que le da el contenido de humedad y la textura del suelo y un potencial gravitacional debido a la profundidad de su localización, en consecuencia, el agua se mueve hacia abajo. En el caso de un surco, el agua se mueve hacia abajo y hacia los lados y en ese caso, el movimiento lateral obedece sólo al potencial mátrico. El movimiento o flujo del agua en el suelo puede ser saturado o no saturado y dependerá del potencial del agua en el suelo y de la conductividad hidráulica.

2.4 La Infiltración.

La infiltración, como se mencionó anteriormente, es el proceso de transferencia del agua desde la superficie del terreno hacia el perfil del suelo, sin embargo, en el caso de la sub-irrigación, ésta puede ocurrir desde un canal profundo o una tubería perforada dentro del perfil del suelo. La medición y la utilización de la información sobre infiltración dependerán del uso que se le quiera dar a la misma y de la escala de tiempo que se quiera utilizar. La tasa de infiltración de los suelos depende de las características físicas y químicas de los mismos y de la forma de aplicación de agua, por ese motivo, es necesario conocer la forma de medición de la infiltración antes de utilizar la información para una finalidad determinada.

Indiferentemente de la forma de medición o aplicación de agua, la tasa inicial de infiltración de los suelos depende del contenido de humedad de los mismos. Al inicio del proceso, la tasa de infiltración es alta disminuyendo con el tiempo hasta alcanzar valor constante. Ese valor constante se denomina **infiltración básica** y la misma depende en gran parte de la textura de los suelos. La figura 2.4.3 muestra una **curva de infiltración**.

Figura 2.4.1 Medición de la infiltración por del método de los cilindros.



2.4.1 Ecuaciones de infiltración.

La forma tradicional de medir la infiltración consiste en la utilización de cilindros infiltrómetros, tal como se muestra en la figura 2.4.1. En ese procedimiento se mantiene una lámina constante sobre la superficie del terreno y por consiguiente existe un frente saturado. La infiltración se determina midiendo la lámina infiltrada en función del tiempo. El procesamiento de la información culmina con la obtención de la **ecuación de infiltración** la cual expresa la misma como una función del tiempo. La forma más común de las ecuaciones de infiltración es la ecuación de Kostiakov (1940) la cual expresa que:

$$F = K t^n \quad (2.6)$$

En la cual **F** es la infiltración acumulada (lámina), **K** es una constante cuyo valor depende de las unidades de **F** y de tiempo, **t** es el tiempo y **n** un exponente que representa el gradiente de disminución de la infiltración con el tiempo. Tanto **K** como **n** están relacionados con la textura y estructura de los suelos. El cuadro 2.4.1 y la figura 2.4.2 muestran la información de pruebas de infiltración.

La infiltración instantánea representa la tasa de variación de la infiltración con relación al tiempo y por consiguiente se obtiene derivando la ecuación (2.6):

$$f = \frac{\delta F}{\delta t} = Knt^{n-1} \quad (2.7)$$

en donde **f** es la infiltración instantánea (lámina/tiempo). Por lo general **f** se expresa como cm/h.

La ecuación (2.7) indica que cuando el tiempo tiende al infinito, la infiltración tiende a cero, lo cual no es cierto ya que como se mencionó anteriormente, la infiltración se reduce hasta llegar a una tasa mínima, igual a la infiltración básica. Esto indica que ese tipo de ecuaciones tienen limitaciones para todos los usos.

Las consideraciones anteriores llevaron a la utilización de ecuaciones como la propuesta por Horton (1936) y la cual se expresa como:

$$f = f_c + (f_0 - f_c) e^{-kt} \quad (2.8)$$

en donde **f** es la infiltración instantánea, **f₀** es la tasa máxima de infiltración, al inicio de la misma, **f_c** es la infiltración básica, o tasa constante de infiltración, **k** es un coeficiente dependiendo del suelo y **t** es el tiempo, generalmente en minutos. La ecuación corrige el problema de la ecuación de Kostiakov ya que cuando el tiempo es muy largo el segundo término tiende a cero, predominando la infiltración básica, **f_c**. Esa ecuación fue desarrollada utilizando simuladores de lluvia y por lo tanto su uso es reducido.

Recientemente, con la aparición de los modelos de simulación, se ha popularizado la ecuación de Green Ampt la cual estima la infiltración en base al contenido de humedad del suelo y la conductividad hidráulica. El modelo EPIC utiliza esa ecuación cuando se desea programar riego y drenaje. En el Anexo B se amplía el tema de la estimación de la infiltración.

Cuando la aplicación del agua no cubre toda la superficie del terreno o ésta no es constante en el tiempo, las ecuaciones anteriores no funcionan bien, debiendo utilizarse otro tipo de enfoque. En el tema siguiente se trata este asunto.

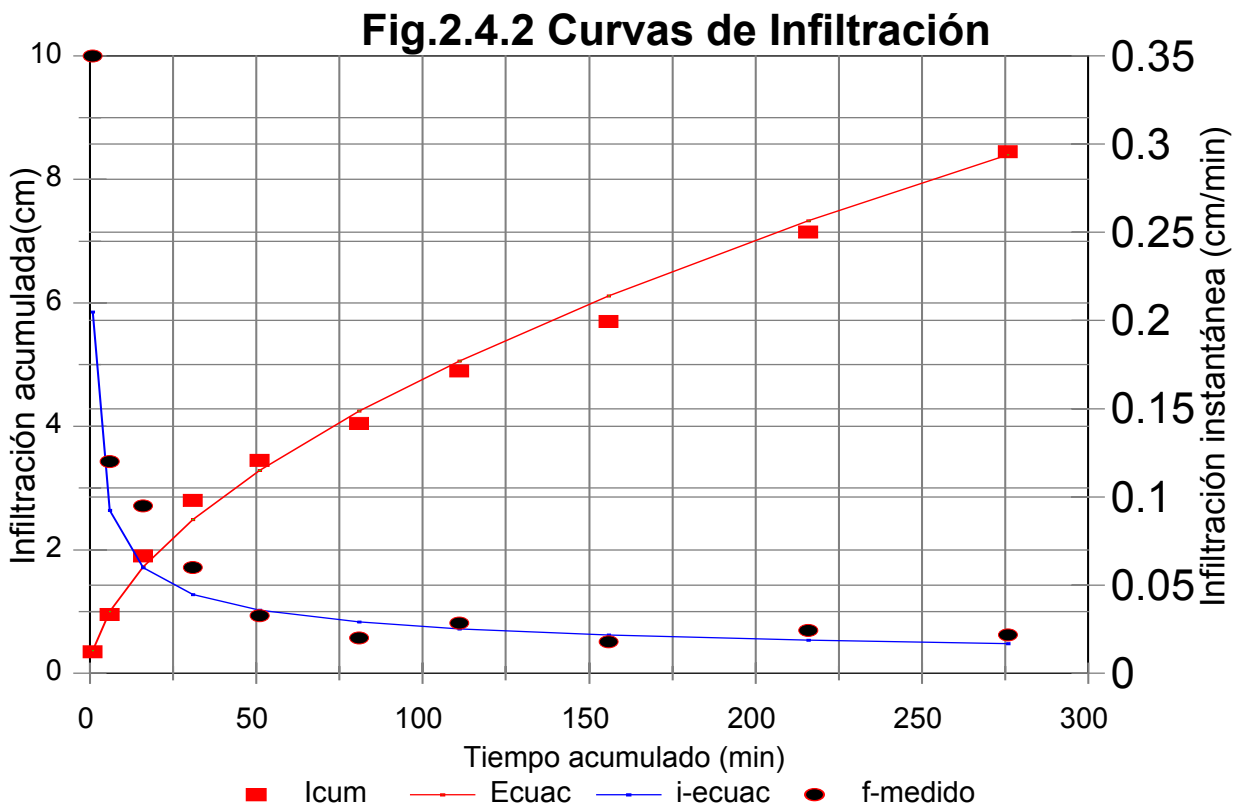
2.4.2 Utilización de la información de infiltración en riego.

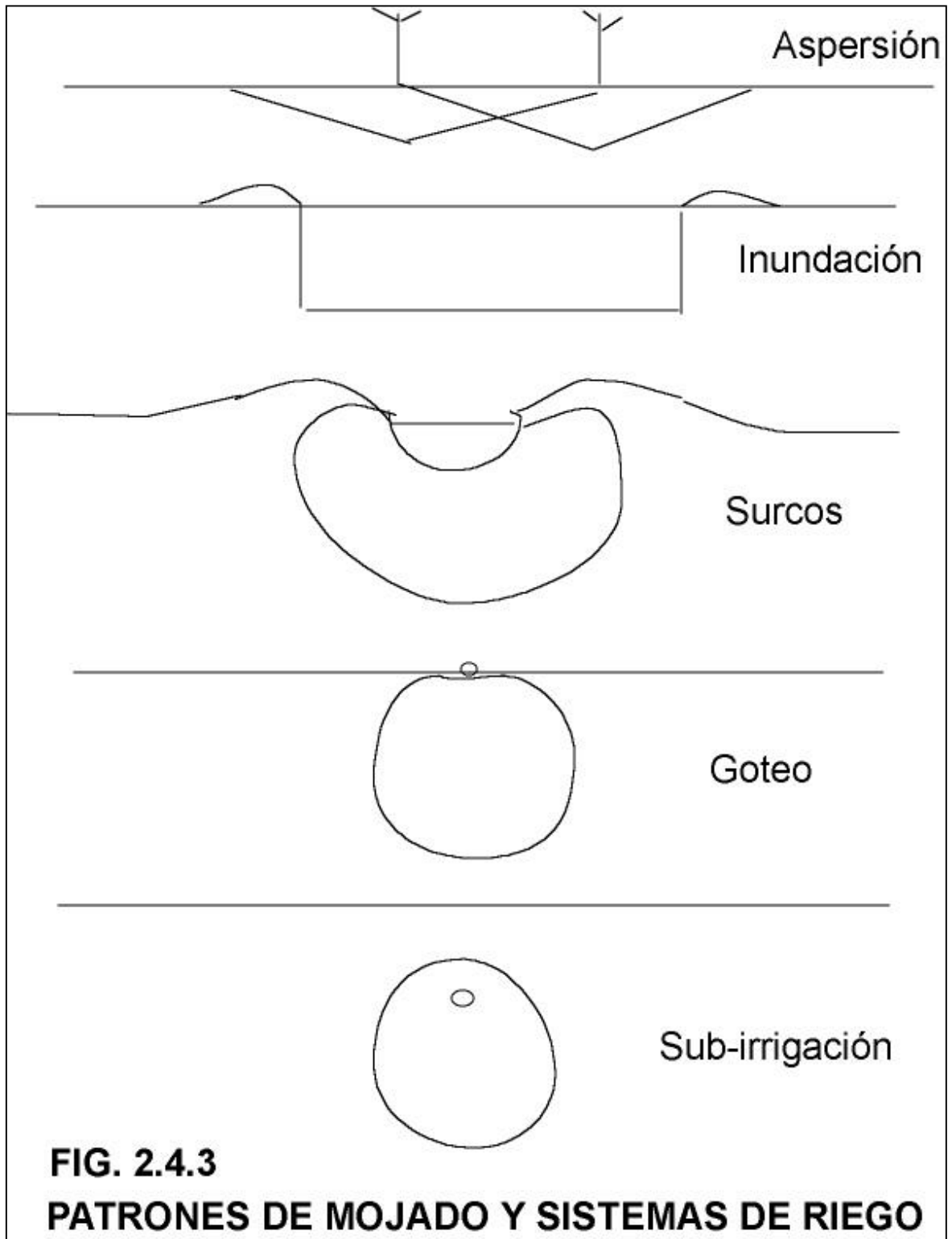
Antes del apareamiento de las calculadoras programables y las computadoras personales, la utilización de las ecuaciones de infiltración era bastante reducida y en consecuencia se utilizaban métodos muy sencillos. Por otra parte, el avance del riego hizo necesario introducir modificaciones en la determinación de la misma a fin de adaptarse a los diferentes métodos existentes. La figura 2.4.3 muestra esquemas de la infiltración para diferentes métodos de riego.

Cuadro 2.4.1 Prueba de Infiltración en suelo Franco arcilloso				
tcum	Medidos		Calculado **	
	F-cum	f	Fcum	f
1	0.35	0.350	0.369	0.205
6	0.95	0.120	1.000	0.093
16	1.9	0.095	1.724	0.060
31	2.8	0.060	2.491	0.045
51	3.45	0.033	3.285	0.036
81	4.05	0.020	4.249	0.029
111	4.9	0.028	5.062	0.025
156	5.7	0.018	6.117	0.022
216	7.15	0.024	7.330	0.019
276	8.45	0.022	8.400	0.017

lb = 0.022

** $F = 0.369 t^{0.556}$ y $f = 0.205 t^{-0.444}$





Un buen diseño y operación del riego requiere de la optimización del recurso agua y consecuentemente una gran **eficiencia de aplicación** de la misma. Como puede verse en la figura 2.4.3, cada método de aplicación de agua tiene una forma diferente del patrón de distribución de agua y consecuentemente en cada caso se deberá escoger la metodología que permita hacer una mejor estimación de la infiltración o manera de aplicar el agua. La gran diferencia entre los métodos radica en la forma de aplicación de agua. Se pueden mencionar varias formas de aplicación de agua de acuerdo a la manera de aplicar la misma, la distribución espacial del agua y la distribución temporal de la aplicación.

Por la forma de aplicación del agua se pueden dividir en: a) superficial, b) aérea y c) subterránea y d) localizada.

a) Superficial.

En esta forma se utiliza la superficie del terreno como medio de aplicación de agua. Los casos típicos son el riego por inundación y el riego por surcos. Por lo general el agua se mantiene sobre la superficie del terreno por varias horas. La **inundación** consiste en la aplicación de agua de tal manera que ésta inunde superficies rectangulares de tamaños relativamente grandes; este es el caso del **riego por melgas**. El caso extremo lo constituye el riego del arroz en el cual la superficie se mantiene inundada durante todo el ciclo del cultivo. El otro caso lo constituye el **riego por surcos** en el cual el agua es aplicada dentro de surcos los cuales sólo ocupan parte del terreno. En ambos casos, durante la aplicación de agua, se mantiene una lámina cubriendo la superficie y el flujo es básicamente vertical.

b) Aplicación aérea.

El agua se aplica utilizando el aire como método de aplicación de agua. En este caso, no se permite el escurrimiento y en consecuencia la aplicación de agua se realiza a una tasa inferior a la infiltración básica. Al igual que en la anterior, el flujo del agua en el suelo es vertical. **La aplicación aérea** se corresponde al **riego por aspersión**.

c) Aplicación subterránea.

La **aplicación subterránea** consiste en aplicar el agua de tal manera que la fuente se encuentra en una posición por debajo de la superficie del terreno. Puede ser por medio de zanjas o por tubos perforados. El primer caso se corresponde con la **subirrigación** clásica y el segundo con el **riego por goteo** con tuberías enterradas. En este último caso, el agua fluye de forma lateral y vertical de acuerdo a los potenciales hídricos.

d) Aplicación localizada.

La aplicación localizada es aquella mediante la cual el agua se aplica en ciertos puntos dentro del área de riego, ya sea en una línea de puntos o al pié de las plantas. En este caso, el medio de aplicación de agua son los emisores o goteros. Este es el método clásico del **riego por goteo**.

Otra forma de clasificación puede ser por la cobertura espacial y en ese caso se puede dividir en: a) cobertura total, b) fuente lineal y d) fuente puntual.

a) Cobertura total.

Esta forma se corresponde con el método de inundación y la subirrigación clásica en la cual se aplica el agua por zanjas de manera de elevar el nivel freático hasta una altura cercana a la superficie y luego se deja descender. En este caso, la infiltración ocurre de la manera clásica, con flujo vertical desde una superficie saturada.

b) Fuente puntual.

Como su nombre lo indica, el agua se aplica en un punto. En este caso, la infiltración ocurre en todas las direcciones formando los llamados **bulbos de humedecimiento** y por lo tanto los métodos clásicos de determinación de la infiltración no pueden ser aplicados directamente. La fuente puntual se corresponde con el **riego por goteo o riego localizado**.

c) Fuente lineal

La fuente lineal consiste en la aplicación de agua en una línea. La línea de aplicación puede ser **continua**, como en el caso del riego por surcos y tuberías perforadas de goteo o **no continua** como el caso del riego por aspersión y el riego por goteo clásico. En esta última forma, el agua fluye desde **emisores**, los cuales pueden ser: aspersores, microaspersores o goteros. La infiltración dependerá del espaciamiento de las líneas y emisores. En el caso del riego por aspersión, los aspersores y las líneas de aspersión son distanciadas de tal manera de ofrecer una cobertura total mediante el solapamiento de las áreas mojadas y como el flujo es siempre vertical, se puede lograr una buena distribución. En el riego por goteo para cultivos en hileras, la fuente lineal se logra mediante el solapamiento de varias fuentes puntuales, sin embargo los laterales se colocan de tal manera que no exista solapamiento entre líneas.

Como puede deducirse, en este caso tampoco pueden ser utilizados los métodos clásicos de infiltración.

Finalmente la aplicación temporal del agua puede requerir de mejores conocimientos de la infiltración. En los casos del riego por **Pivote Central**, y **riego por pulsaciones** se requiere de metodologías especiales para su diseño.

2.3.3 Utilización de la información de infiltración en Hidrología.

El análisis de precipitación-escorrentía muy utilizado en hidrología, especialmente en modelos hidrológicos, requiere del conocimiento de la infiltración. En este caso, no se pueden utilizar los mismos procedimientos que en riego ya que la distribución temporal de la precipitación, por lo general, no es homogénea; esto implica la necesidad de buscar otros métodos de estimación de la infiltración que se adapten a las metodologías que se quieran aplicar.

La infiltración instantánea sólo se utiliza en modelos de eventos en los cuales pueden emplearse ecuaciones tipo Horton, sin embargo, como se mencionó anteriormente estas sólo sirven si la lluvia es homogénea en el tiempo. Para modelos diarios, se deben utilizar otros procedimientos como la ecuación de Green Ampt y el Método del Número de Curva. Estos métodos serán detallados en el anexo A.

2.5 Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica representa la capacidad de transmisión de agua del suelo y está íntimamente ligada al espacio poroso del suelo. Para fines prácticos, sólo la conductividad hidráulica saturada es considerada en estudios de riego y drenaje. La conductividad hidráulica no saturada es muy difícil de medir y en la práctica se usa muy poco ya que la medición de la infiltración prácticamente elimina la necesidad de estimarla. Recientemente en los modelos de simulación se ha estado utilizando esta variable.

La conductividad hidráulica saturada, permeabilidad, es fundamental para los estudios de drenaje y agua subterránea. Su medición se puede realizar en el laboratorio, sin embargo la mejor manera es hacerla en el campo. En el anexo B se describe su medición.

3. Relaciones suelo-planta

La función más conocida del suelo es la de dar soporte o sustentación a la vegetación. El término “sustentación” puede interpretarse como el de dar apoyo a la vegetación o como dar alimento o ambas cosas. En realidad ocurren ambas cosas y de esa manera el suelo proporciona estabilidad a las plantas, le ofrece nutrientes y agua. Por otro lado, el suelo puede contener sales y sustancias tóxicas que perjudican el crecimiento de las plantas y estratos compactados que limitan el desarrollo de los mismos. Como contrapartida, la vegetación mejora los suelos incorporando materia orgánica y dándole protección contra la erosión.

En el presente capítulo se revisarán algunas de las relaciones suelo – planta aplicadas a la elaboración de proyectos de aguas y tierras.

3.1 Disponibilidad de nutrientes

El suelo es el principal suministrador de nutrientes para las plantas, sin embargo, el mismo suelo puede ofrecer limitaciones para el uso de los mismos, tales como el **pH**. La disponibilidad de nutrientes para el uso de las plantas dependerá de las formas como están los nutrientes en el suelo y de la **capacidad de intercambio de cationes**. Además de lo anterior, la disponibilidad de nutrientes en el suelo dependerá del contenido de humedad de los mismos, por otro lado, la absorción de nutrientes por las plantas dependerá de aquellos nutrientes que estén en menor cantidad, en respuesta a la famosa “ley del mínimo”. Este es un tema muy complejo que no puede ser tratado en detalle en este tipo de documento. El cuadro 3.1.1 muestra los nutrientes extraídos por algunos cultivos comerciales, indicando la necesidad de reposición de éstos a fin de mantener la fertilidad de los suelos.

Cuadro 3.1.1 Extracción de Nutrientes y disponibilidad en el suelo

Cultivo	Producto	Rend (t/ha)	Extrac. (kg/ha)				Total NPK
			N	P	K	Ca	
Banana	racimo	30	142	18	365	13	525
Cacao	frutos	1	20	6	30	3	56
Café	frutos	2	33	3	52	7	88
Caña Az.	cañas	100	132	8	110	13	250
Frijoles	granos	1	37	4	22	4	63
Yuca	raíces	19	39	4	32	12	75
Maíz	grain	6.4	122	24	30	0.4	176
Tomate	frutos	41	72	18	130	7	220
Cupuaçu	frutos	5	19.3	2.2	24.8	1.12	46.3
Maracuja	frutos	20	60	15.6	75		150.6
Disponibilidad en Oxisol			56.33	0.4	1.86	10.4	58.59

Fuente: EMBRAPA , 1999; Miller, 1997 and Rizzi et.al (1998)

3.2 Disponibilidad de agua.

La disponibilidad de agua es una de las más importantes relaciones suelo-planta. El suelo almacena agua y la pone a disposición de las plantas dependiendo del contenido de humedad y potenciales de agua. Cada planta requiere de condiciones ideales de abastecimiento de agua y cuando éstas no son cumplidas, la planta comienza a sufrir de “stress hídrico”. El cuadro 3.2.1 muestra el **umbral de riego** para varios cultivos. El umbral de riego representa el mínimo contenido de humedad para no limitar el crecimiento y generalmente se expresa como una tensión o succión lo cual implica conocer la curva característica de humedad. Otra forma de expresar la humedad óptima para un cultivo es mediante el uso de **porcentaje de agua útil**. El cuadro 3.2.1 muestra esos valores para algunos cultivos.

Cuadro 3.2.1 Datos generalizados de enraizamiento y fracción de agua útil ideal para varios cultivos Adaptado de Doenbros (1979)		
Cultivo	Profundidad Radical (m)	Fracción** ideal de agua útil
Alfalfa	1.0-2.0	0.55
Algodón	1.0-1.7	0.65
Apio España	0.3-0.5	0.2
Arvejas	0.6-1.0	0.35
Bananas	0.5-0.9	0.35
Batata dulce	1.0-1.5	0.65
Cana de Azúcar	1.2-2.0	0.65
Cebolla	0.3-0.5	0.25
Cítricas	1.2-1.5	0.5
Espinaca	0.3-0.5	0.2
Fresas	0.2-0.3	0.15
Frijoles	0.5-0.7	0.45
Girasol *	0.8-1.5	0.45
Lechuga	0.3-0.5	0.3
Maíz *	1.0-1.7	0.6
Melones	1.0-1.5	0.35
Papa	0.4-0.6	0.25
Pastos	0.5-1.5	0.5
Pepino	0.7-1.2	0.5
Pimentón	0.5-1.0	0.25
Piña	0.3-0.6	0.5
Remolacha	0.6-1.0	0.5
Repollo	0.4-0.5	0.45
Sorgo *	1.0-2.0	0.55
Soya	0.6-1.3	0.5
Tabaco	0.5-1.0	0.35
Tomates	0.7-1.5	0.4
Vegetales	0.3-0.6	0.2
Vid (uvas)	1.0-2.0	0.35
Zanahoria	0.5-1.0	0.35

* valores mayores en la maduración
** cuando ET es \Rightarrow 3mm/día, se aumenta en un 30%
cuando ET es 8mm/día o mayor, se reduce en un 30%

La figura 3.2.1 muestra la variación de rendimientos del maíz dependiendo de la disponibilidad de agua. Puede observarse que hasta una succión cercana a 0.8 atmósferas (80 kP), los cultivos no disminuyen su rendimiento.

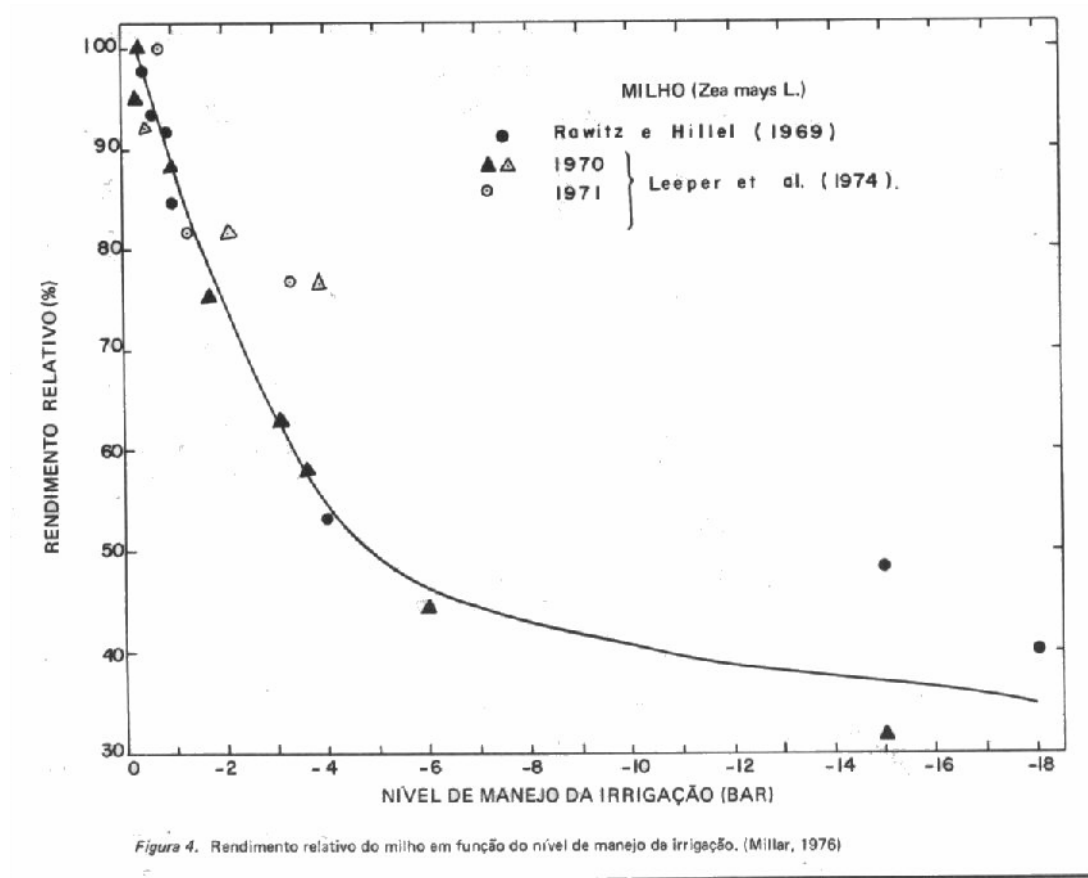


Figura 3.2.1 Rendimiento relativo del maíz de acuerdo al nivel de riego. (Millar, 1984)

3.3 Salinidad y Alcalinidad.

El tema de la salinidad es muy extenso y generalmente ocupa espacio suficiente para un curso especializado. El tema puede encontrarse en los textos de riego y drenaje. En esta sección se tratarán algunos aspectos prácticos de mayor relevancia.

El contenido de sales de los suelos tiene influencia sobre la asimilación de agua por los cultivos ya que aumenta el potencial osmótico de la solución del suelo; esto trae como consecuencia una disminución del crecimiento de los cultivos. Por otra parte, el contenido de sodio de los mismos afecta la estructura de los suelos y disminuye la infiltración. La determinación del contenido de sales de los suelos se realiza mediante análisis de laboratorio

o utilizando métodos indirectos que utilizan la conductividad eléctrica, CE, de la solución del suelo. En el anexo A se explica la metodología.

El contenido de sales puede expresarse como sales totales (me/l), contenido de sodio (%) o como **conductividad eléctrica, CE**, la cual se expresa como milimhos por centímetro (mmhos/cm). En el caso de sodio se expresa como **porcentaje de sodio intercambiable, PSI**. De acuerdo al contenido de sales y de sodio, El United States Bureau of Reclamation , USBR(1954) clasifica los suelos como: salinos, salino-sódicos y sódicos no salinos. El cuadro 3.3.1 presenta los detalles.

Cuadro 3.3.1 Clasificación de los suelos salinos y alcalinos (USBR,1954)

Suelo	CE (mmhos/cm)	PSI	pH
Salinos	> 4	< 15	< 8.5
Salino Sódicos	> 4	> 15	> 8.5
Sódicos no salinos	< 4	> 15	8.5 a 10

Los cultivos presentan grandes diferencias en su tolerancia a la salinidad. En la literatura puede encontrarse mucha información al respecto. Doorenbos y Pruitt (1976), por ejemplo, presentan una metodología para estimar el rendimiento relativo de los cultivos dependiendo de la salinidad del suelo, Grassi (1991) presenta la metodología anterior con tablas para utilizarlo.. Un estudio reciente en Nebraska, USA (Hoffman, 1999), presenta la misma metodología y en la cual se estima el rendimiento relativo, Y_r , como:

$$Y_r = 100 - s(EC_e - EC_m) \quad (3.3.1)$$

Cuadro 3.3.2 . Valores de EC_m y s para estimar rendimientos relativos, Y_r , para varios cultivos

Cultivo	EC_m	Pendiente s
Alfalfa	2.0	7.3
Cebada, grano	8.0	5.0
Trébol	1.5	12.0
Maíz, grano	1.7	12.0
Maíz, ensilaje	1.8	7.4
Papa	1.7	12.0
Sorgo, grano	6.8	16.0
Soya, grano	5.0	20.0
Remolacha Azucarera	7.0	5.9
Tomate	2.5	9.9
Trigo, grano	6.0	7.1

En la cual Y_r es el rendimiento relativo (%), s es la pendiente de la curva de tolerancia, EC_e es la conductividad promedio del extracto de saturación del suelo y EC_m es la conductividad a partir de la cual comienza el daño a los cultivos. La figura 3.3a Presenta las curvas de tolerancia de algunos cultivos. El cuadro 3.3.2, presenta valores de EC_m y s para varios cultivos. El valor, EC_m , como puede verse se corresponde con valores de Y_r de 100 de la figura 3.3.a

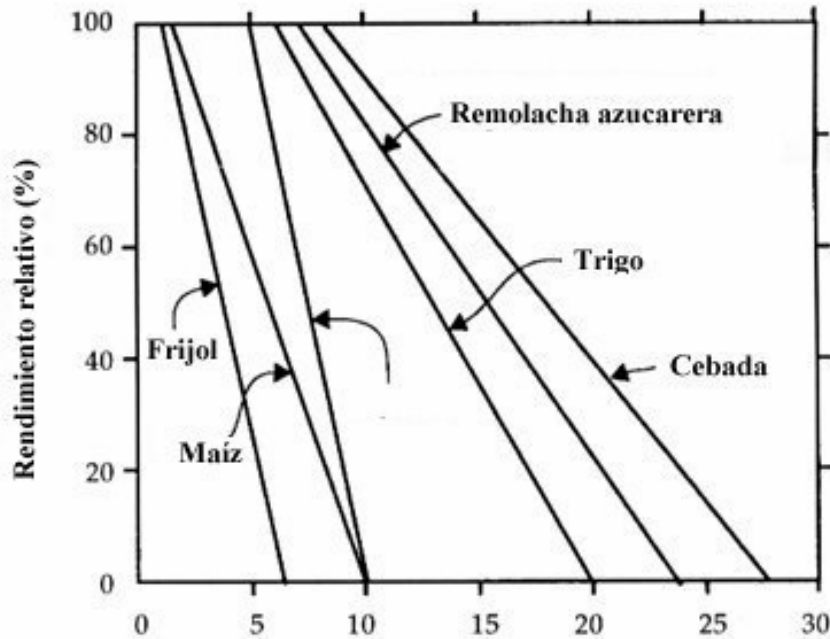


Fig. 3.3a Conductividad Eléctrica del Extracto Saturado (mmhos/cm)

3.4 Toxicidad

Algunos componentes minerales del suelo pueden ser tóxicos para las plantas o interfieren la asimilación de nutrientes. Los casos más importantes son los del boro y el aluminio. El boro puede perjudicar el desarrollo foliar de los cultivos induciendo necrosis de los tejidos. El aluminio. El aluminio puede perjudicar el desarrollo de las raíces en ciertos estratos ácidos. Una de las formas de cuantificar ese efecto es el índice de saturación de aluminio. En el modelo EPIC (Williams, 1995) se utiliza el “Aluminum Toxicity Stress”, ATS, como un indicador:

$$ATS_{\ell} = \frac{100 - ALS_{\ell}}{100 - ALO_j}, \quad ALS_{\ell} > ALO_j \quad (3.4.1)$$

$$ATS_{\ell} = 1.0, \quad ALS_{\ell} \leq ALO_j \quad (3.4.2)$$

en donde ATS es el factor de stress para toxicidad de aluminio (0-1) para el estrato, ALS es la saturación de aluminio (%) y ALO es el máximo valor de ALS que el cultivo puede tolerar sin stress (%). Los valores específicos de ALO son determinados con la ecuación:

$$4LO_j = 10 + 20(ALT_j - 1) \quad (3.4.3)$$

en donde ALT_j es el índice de tolerancia de Aluminio para el cultivo j. Esos valores oscilan entre 1 y 5 (1 es sensitivo y 5 tolerante).

3.5 Compactación

La compactación de los suelos afecta la densidad aparente de los mismos, disminuyendo el agua disponible, limitando la penetración de las raíces y disminuyendo la aireación. La compactación puede ser provocada por un mal manejo de los suelos. El pie de arado, es uno de los efectos más conocidos.

3.6 Efecto de las plantas sobre el suelo.

En los temas anteriores se ha mencionado el efecto de los suelos sobre las plantas; en esta sección se mencionarán algunos aspectos positivos de las plantas sobre los suelos. Entre los efectos más importantes son: a) incorporación de materia orgánica, b) protección contra la erosión, c) mejoramiento de la infiltración, d) fijación de nitrógeno y e) formación del suelo.

Uno de los efectos más importantes es la **incorporación de materia orgánica al suelo**, la cual, a su vez, además mejorar la fertilidad del suelo, tiene influencia sobre la infiltración, retención de humedad y erosión. En la figura 2.1.3, antes explicada, puede notarse la influencia de la materia orgánica sobre la retención de humedad. La erodabilidad de los suelos (factor K de la USLE) está directamente relacionado al contenido de materia orgánica.

La vegetación ofrece **protección contra la erosión** a través de la cobertura. El coeficiente C de la USLE es una representación del factor cobertura aportada por la vegetación. Este efecto aunado a la incorporación de materia orgánica es de gran importancia en el control de la erosión.

La vegetación **mejora la infiltración** mediante varios mecanismos entre ellos: materia orgánica, raíces, creación de déficits hídricos y controlando la escorrentía.

Otro de los efectos de la vegetación lo constituye la **fijación de nitrógeno** por las bacterias del suelo, las cuales establecen una simbiosis con las raíces de algunos cultivos, en especial las leguminosas.

Finalmente la vegetación es un factor de importancia en la formación del suelo. En ese sentido, la penetración de las raíces crea condiciones propicias para la incorporación de materia orgánica en estratos profundos favoreciendo la acción de otros factores de meteorización. Los suelos Podzólicos y los Histosoles son el mejor ejemplo de ello.

4. Relaciones planta-atmósfera

Las relaciones planta-atmósfera pueden ser analizadas considerando que los factores agua y suelo no son limitantes. Entre las relaciones más importantes se encuentran: a) La

evapotranspiración potencial, b) el crecimiento potencial, c) la temperatura y d) la fotosíntesis. En esta sección se tratará sobre los tres primeros y se utilizará, básicamente, los conceptos del modelo EPIC (Williams, 1995), por ser éstos relativamente sencillos y prácticos.

4.1 Evapotranspiración potencial

La evapotranspiración es el efecto combinado de la evaporación del agua del suelo y de la transpiración de las plantas. La **evapotranspiración potencial** es el valor máximo de la evapotranspiración que puede ocurrir en un momento dado si no hay limitaciones de suelo y agua. Esta depende del poder **evaporante de la atmósfera**, el cual es una función de la energía solar y de las características y estado de crecimiento de las plantas. La evapotranspiración potencial en sí no se mide, siendo que su determinación se hace por métodos indirectos. Mediante la utilización de **lisímetros**, se puede medir la **evapotranspiración real**, la cual, como su nombre lo indica es aquella que ocurre realmente.

Los lisímetros son aparatos que se utilizan para medir la evapotranspiración. Su principio es muy sencillo, sin embargo en la práctica es muy difícil realizar las mediciones, particularmente por el costo y esfuerzo necesario. Los lisímetros consisten de un recipiente en el cual se coloca suelo con un cultivo. Se debe asegurar que el cultivo no tiene ninguna limitación y en consecuencia, se deberá mantener el contenido de humedad a un nivel óptimo. El procedimiento de medición consiste en medir las entradas y las salidas de agua del recipiente; mediante un sistema de pesaje, se determina el peso del recipiente a varios intervalos de tiempo. Luego se realiza un balance de las entradas, salidas y diferencias de peso. Como resultado de ese balance, se determina la evapotranspiración. En el anexo A se explica en más detalle la utilización de los lisímetros.

En la práctica la evapotranspiración se estima por métodos indirectos basados en el clima y calibrados con información obtenida con lisímetros. Uno de los trabajos más completos sobre el tema es el presentado por Doorembros y Pruitt (1976); en el modelo EPIC (Williams, 1995) se presentan nuevos enfoques con adaptaciones para modelos de simulación. La mayoría de estos métodos utiliza un cultivo de referencia o la evapotranspiración de una superficie con agua libre. La evapotranspiración se calcula como:

$$E_t = K_c E_{tp} \quad (4.1.1)$$

En donde **E_t** es la evapotranspiración, **K_c** es un coeficiente de cultivo y **E_{tp}** es la evapotranspiración potencial para un cultivo de referencia, generalmente grama o pasto bermuda. Doorembros y Pruitt (1976) presentan varios métodos para estimar E_{tp} ; los mismos autores y Christiansen y Hargreaves (1969), entre otros, presentan métodos y tablas para estimar K_c . Lo más generalizado últimamente es estimar la evaporación potencial, E_o y luego estimar E_t en función del área foliar del cultivo. En el modelo EPIC, se presentan las siguientes ecuaciones:

$$E_p = \frac{(E_o)(LAI)}{3.0}, \quad 0 \leq LAI \leq 3.0 \quad (4.1.1)$$

$$EP = E_o \quad LAI > 3.0 \quad (4.1.2)$$

en donde **Ep** es la evaporación potencial de las plantas en mm/día, **Eo** es evaporación potencial y **LAI** es el índice de área foliar. La evaporación potencial desde el suelo se calcula como:

$$E_s = (E_o)(EA) \quad (4.1.3)$$

en donde **E_s**, es la evaporación potencial desde el suelo en mm/día y **EA** es el índice de cobertura del suelo calculado como:

$$EA = \exp(-0.05 CV) \quad (4.1.4)$$

en donde **CV** es la suma de la biomasa aérea y residuos de cultivos en t/ha.

La evaporación potencial, **Eo**, puede ser calculada por cualquier método debidamente probado, tales como la ecuación de Penman. En el anexo A se amplía este tema.

En Venezuela no existe información climatológica suficiente para utilizar ese tipo de ecuaciones, por el contrario, la información más difundida se refiere a la evaporación del tanque A. Varios autores entre ellos Pruit (1960), Doorembos y Pruit (1976) y López y Mathison (1966) han demostrado que la evaporación es uno de los mejores indicadores de la evapotranspiración. La figura 4.1.1 muestra que la tendencia de la curva de evapotranspiración es similar a la de la evaporación, lo cual indica que el valor de **Eo** puede estimarse al multiplicar la evaporación por un factor. Para el caso de Venezuela, Lopez y Mathison (1966) encontraron que el coeficiente a utilizar es 0.75. de esa manera:

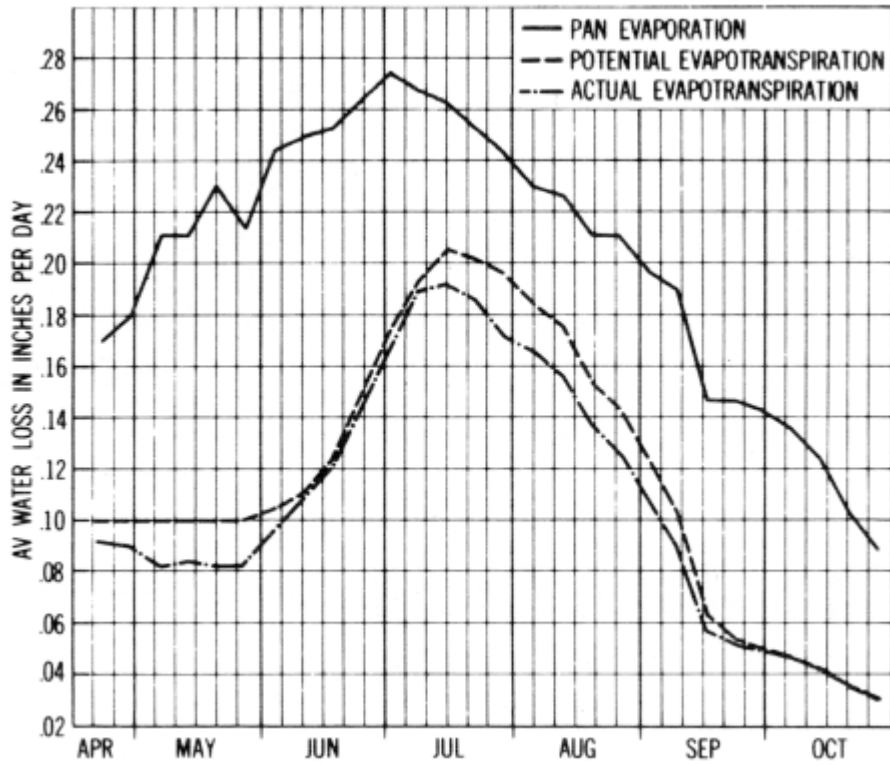
$$E_o = 0.75 E_v \quad (4.1.5)$$

En donde **Eo** es la evaporación potencial y **Ev** es la evaporación del tanque A.

4.2 Crecimiento Potencial

El crecimiento potencial de las plantas depende de la energía solar, la temperatura ambiental y del suelo. Para que ese crecimiento se manifieste, tendrá que haber condiciones ideales de suelo y agua.

Figura 4.1.1 Comparación de valores de Evaporación y evapotranspiración.



En el modelo EPIC se establece que desarrollo fenológico del cultivo se basa en la acumulación diaria de unidades de calor, HU, las cuales se calculan con la ecuación:

$$HU_k = \left(\frac{T_{mx,k} + T_{mn,k}}{2} \right) - T_{b,j}, \quad HU_k \geq 0 \quad (4.2.1)$$

en donde: HU_k , $T_{mx,k}$ y $T_{mn,k}$ son los valores de las unidades de calor, temperatura máxima y mínima para el día k y $T_{b,j}$ es la temperatura básica del cultivo j (por debajo de la temperatura básica, no ocurre crecimiento). Esto indica que la temperatura es de gran importancia en el crecimiento de los cultivos.

El **desarrollo Potencial** es aquel que ocurre en circunstancias normales sin limitaciones de suelo y agua. Para el cálculo de éste, se utiliza la ecuación de la ley de Beer (Monsi y Saeki, 1953):

$$PAR_i = 0.5 (RA)_i [1 - \exp(-0.65 LAI_i)] \quad (4.2.2)$$

en donde **PAR** es la radiación fotosintética activa interceptada (MJ^{-2}), **RA** es la radiación solar (MJ^{-2}), **LAI** es el índice de área foliar y el subíndice i es el día de simulación. El incremento

potencial de biomasa para un determinado día se estima utilizando el método de Monteith (1977), el cual se expresa como:

$$\Delta B_{p,i} = 0.001 (BE)_j (PAR)_i \quad (4.2.3)$$

en donde $\Delta B_{p,i}$ es el incremento potencial diario de biomasa (t/ha) **BE** es el parámetro para convertir energía a biomasa para el cultivo *j* ($\text{kg ha}^{-1} \text{MJ}^2$). Como se puede ver la radiación solar es también de gran importancia en el desarrollo de los cultivos.

4.3 Temperatura

En la sección anterior se indicó la importancia de la temperatura en el crecimiento de cultivos. Cuando la temperatura es muy alta puede ocurrir un **stress de temperatura**

$$TS_i = \text{sine}\left(\frac{\pi}{2} \left(\frac{T_{G_i} - T_{b_j}}{T_{o_j} - T_{b_j}}\right)\right), \quad 0 \leq TS_i \leq 1 \quad (4.3.1)$$

donde **TS** es factor de stress de temperatura de las plantas para el día *i*, **TG** es la temperatura promedio de la superficie del suelo para el día *i* en °C, **Tb** es la temperatura base para el cultivo *j* y **To** es la temperatura óptima para el cultivo *j*. Adicionalmente, cuando la temperatura media diaria excede a 1.5 (T_o).

5. Relaciones agua-planta

El agua es el más importante factor de crecimiento de las plantas. Un suelo fértil con buena temperatura, pero seco, no puede producir nada. De la misma manera un suelo con mucho agua no permite un normal desarrollo de las plantas. En esta sección se tratarán los temas de a) agua y crecimiento, b) déficit de agua, c) excesos de agua, d) calidad del agua y d) evapotranspiración real.

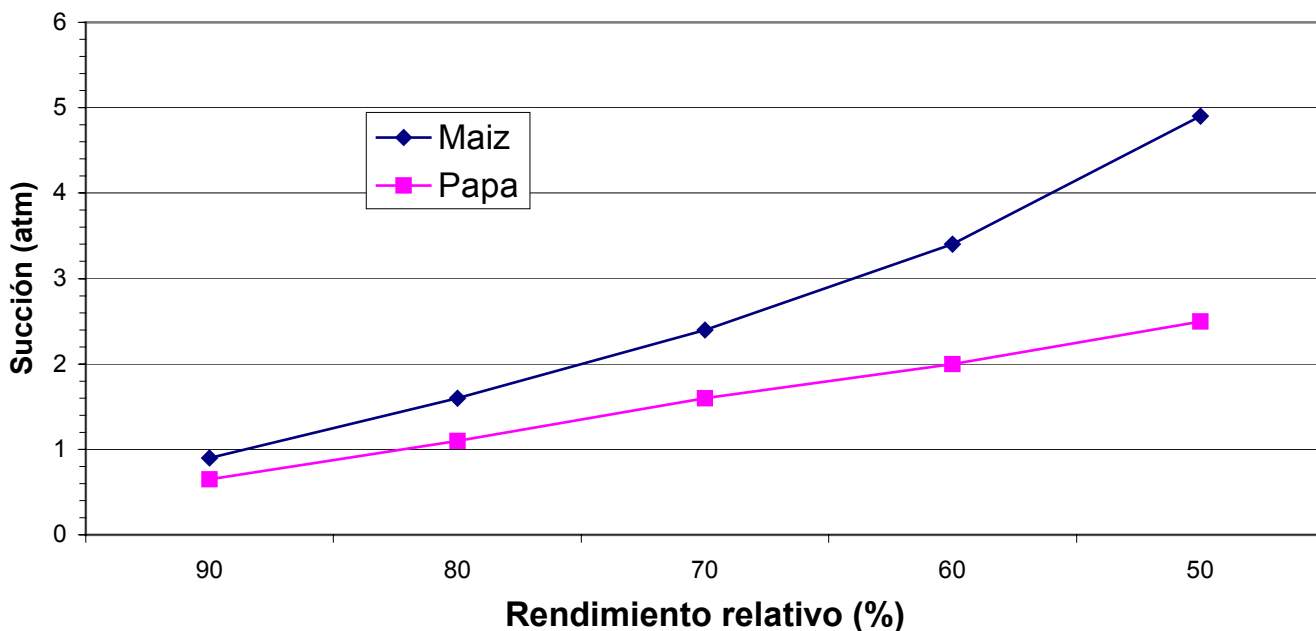
5.1 agua y crecimiento

El crecimiento potencial de las plantas sólo puede ocurrir cuando la humedad del suelo sea suficiente. El estudio de la relación agua – crecimiento es de suma importancia en la planificación de la agricultura de secano y en el diseño de riego y drenaje. La respuesta de las plantas al contenido de humedad dependerá de los potenciales de agua del suelo; de esa manera, al mismo contenido de humedad, en un suelo arenoso hay mejores condiciones que en un suelo arcilloso.

Este tema es ampliamente cubierto en la literatura especializada, en especial en los textos de riego. Con la introducción del concepto de “agricultura con precisión” (**precision farming**) el tema se ha sido objeto de muchos estudios. De la misma manera que con la temperatura, existe un óptimo de humedad para el desarrollo de las plantas. La figura 5.1.1 muestra la respuesta del maíz y la papa a diferentes tensiones, indicando que existe un punto óptimo alrededor de la

capacidad de campo (0.33 atmósferas) y que a -4.9 atm. Los rendimientos se reducen en un 50%. En el caso de la papa, a una tensión de -2.5 atm. Los rendimientos se reducen a 50 %, indicando las diferencias de respuesta de diversos cultivos.

Fig. 5.1.1 Nivel de humedad y Producción



5.2 Deficit de agua.

Lo expuesto en el tema anterior indica que los déficits de agua limitan el crecimiento de las planta y por lo tanto es necesario definirlos para poder planificar el uso de la tierra y para la operación de sistemas de riego. Sin embargo, en la práctica, las deficiencias de agua no ocurren todo el tiempo y por lo tanto es necesario hacer estimaciones, tomando en consideración el uso de agua por las plantas y el contenido de humedad de los suelos. En el caso de operación de sistemas de riego se puede determinar la humedad del suelo con una metodología idónea y tomar las decisiones pertinentes. En el caso de planificación, los déficits son estimados mediante la utilización de balances hídricos diarios o con modelos de simulación. Para ello es necesario conocer las características de humedad de los suelos y el clima. El cuadro 5.2.1 muestra el resultado de balances hídricos diarios para la localidad de Turén, Portuguesa, Venezuela.

En el modelo EPIC se cuantifican las deficiencias mediante un factor de **stress hídrico**, el cual es calculado diariamente como:

$$WS_i = \frac{\sum_{l=1}^M u_{i,l}}{Ep_i} \quad (5.2.1)$$

en donde **WS** es el factor de stress hídrico, **u** es el uso de agua del estrato **l** y **Ep** es el uso potencial de agua en el día **i** . El numerador del lado derecho de la ecuación representa el uso de agua de todos los estratos (de **l=1** hasta **M**). **WS** varía entre 0 y 1

Cuadro 5.2.1 Resumen de Balances Hídricos Diarios: Turén

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
	DEFICIENCIAS											
81	157.2	121.5	133.7	78.1	0	0	0	0	0	0	1.9	60.2
83	140.8	157.7	203.8	89.2	0	0	0	0	0	0	0	41.5
84	115	158.8	205.7	173.7	40.7	0	0	0	0	0	0	14.4
85	151.7	169.2	196.9	146.6	0	5.1	0	0	0	0	0	42.2
86	129.7	148.4	185.9	178.5	0	0	0	0	0	0	6.4	95.1
87	119.6	168.3	165.3	148.9	25.7	0	0	0	0	0	0	35.8
88	150.2	164.6	226.1	186.8	59.4	0	0	0	0	0	0	43.3
89	129.2	152.4	188	176.8	60.7	0	0	0	0	0	0	77
90	136.5	153.7	179.5	147.1	0	0	0	0	0	0	19.8	124.6
91	155.4	170.5	122.2	74.1	29.4	5.5	0	0	0	0	0	10.5
92	151.7	152.2	197.8	98.4	1.6	0	0	0	0	0	0	37.9
93	118.4	157.4	184.9	69.1	0.4	0	0	0	0	1.9	31.1	105.8
94	128.5	161.6	201.9	182.8	29.1	0	0	0	0	0	0	62.7
95	153.9	177.3	126	49.2	3.7	0	0	0	0	0	0	95.7

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
	DIAS DE EXCESO DE AGUA EN EL PERFIL											
81	0	0	0	0	11	21	18	22		6	0	0
83	0	0	0	0	12	19	6	18		5	7	0
84	0	0	0	0	0	0	7	9		5	3	0
85	0	0	0	0	0	0	0	7		4	0	0
86	0	0	0	0	3	4	13	1		0	3	0
87	0	0	0	0	5	9	14	8		5	13	0
88	0	0	0	0	0	20	21	23		18	1	0
89	0	0	0	0	0	8	0	2		10	2	0
90	0	0	0	0	0	18	14	16		0	6	0
91	0	0	0	0	0	1	13	14		0	0	0
92	0	0	0	0	0	13	21	13		8	0	0
93	0	0	0	0	0	8	4	4		4	0	0
94	0	0	0	0	0	1	11	16		9	1	0
95	0	0	0	0	0	14	17	8		6	0	0

5.3 Excesos de agua

El exceso de agua en el suelo tiene efectos negativos para el crecimiento de los cultivos. Entre los efectos negativos se pueden mencionar: a) disminución de la aireación del suelo, b) disminución de la temperatura del suelo, c) reacciones químicas en el suelo. De todos ellos la disminución de la aireación del suelo es la más importante. En la práctica es difícil determinar por separado cada uno de los efectos y por tal motivo, el conocimiento actual de la influencia de los excesos de agua sobre el crecimiento de los cultivos se hace de manera global basado en el tiempo de duración de los excesos de agua. Por lo general no se hace distinción entre la inundación y el exceso de humedad.

Durante una **inundación** el suelo está totalmente cubierto de agua y por lo tanto el intercambio gaseoso entre la atmósfera y el suelo se interrumpe y la aireación tiende a cero. Luego del cese de la inundación el suelo tarda algún tiempo en drenar el exceso de agua. En el caso de excesos de agua sin inundación, el efecto principal es una limitación del contenido de aire de los suelos: este es el caso de niveles freáticos altos y de humedad alta en lugares de clima húmedo.

El cuadro 5.3.1 presenta un resumen de la influencia de niveles freáticos altos sobre la producción de cultivos. La figura 5.3.1 muestra el mismo tipo de información de manera gráfica. En estudios más recientes, se han propuesto varias metodologías para estudiar el efecto de la altura del nivel freático sobre el rendimiento de cultivos.

Cuadro 5.3.1 Rendimiento de Cultivos con diferentes profundidades de nivel freático

(Jan Van Schilfgaarde, Drainage for Agriculture, 1974)

Cultivo	Código**	Profundidad del nivel freático (cm)								
		15	30	40a50	60	75	80a90	100	120	150
Alfalfa	3.7.1				100					92
Maiz	4.6.2	80	100	96	83		93			
Maiz	6.5.1		41	82	85	100	85	45		
Frijoles	6.5.1	45	100	75	65	70				
Soja	6.5.1	64	63	78	100	86				
Tomate	6.7.2	9	28	47	60		100			
Remolacha azuc.	1.1.2			71	84		92		97	100
Papa	1.1.2			90	100		95	92		96
Nabo	5.1.2			77	93		94		100	98
Sorgo	6.1.5	73	86	93	100	93				
Repollo	6.5.1	65	80	100	90	80				
Repollo	6.5.2	33	100	97	100	98				
Repollo	6.4.2	6	85	84	89	89	100	97		
Auyama	6.5.2	2	49	65	100	97				
Auyama	6.4.2	21	48	58	65	78	90	100		
Mostaza	6.4.2	52	96	100	93	95	97	99		
Pimenton	6.5.1	80	86	100						

** código se refiere a: autor, suelo y sistema de agua

1er No	2do. No	3er. No
--------	---------	---------

1. Van Horn	1. Arcilloso	1. Sin riego
2. Gilbert&Chamblee	2. Franco Arcilloso	2. Combinación de riego
3. Tovey	3. Franco Arcillo Limoso	
4. Goins et.al	4. Franco	
5. Hooghoudt	5. Franco arenoso	
6. Williamson&Kriz	6. Areno francoso fino	
	7. Mexcla de 2,4,5	

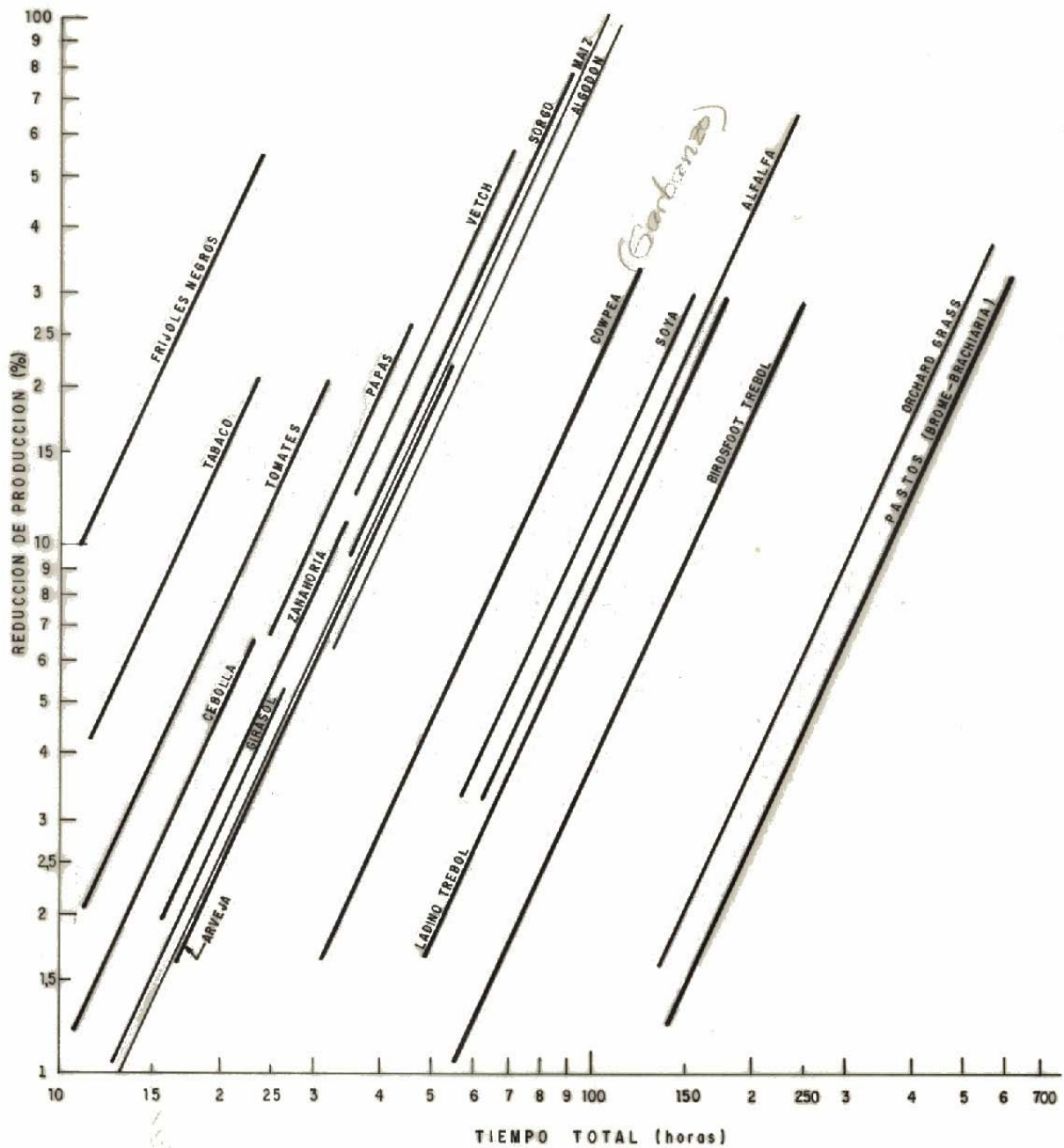


Figura. 3. - Curvas únicas de daños para diferentes cultivos. Valores ajustados a 25°C y tiempo total. (Rojas, 1984).

5.4 Calidad del agua

La calidad del agua puede ser referida a calidad física y calidad química. La calidad física principal se refiere al contenido de sedimentos y por lo general no afecta a las plantas de forma apreciable. La calidad química afecta a las plantas de dos maneras: a) por salinidad y b) por toxicidad.

Ya se ha mencionado el tema de la salinidad que afecta la disponibilidad de agua. La toxicidad, se refiere a ciertos cationes que afectan directamente a las plantas como el boro o como el aluminio que afecta la disponibilidad de nutrientes

5.5 Evapotranspiración real

La evapotranspiración real dependerá de la cantidad de agua disponible para las plantas, de esa manera, aun cuando la Etp sea alta, si no hay disponibilidad de agua en el suelo, las plantas sólo tomarán la porción directamente disponible. Algunas plantas son capaces de cerrar los estomas a fin de evitar la evapotranspiración y de esa manera conservar agua. Algunas plantas pueden presentar síntomas de marchitamiento incipiente en horas de alta Etp. La productividad de los cultivos está íntimamente relacionada con la cantidad real de evapotranspiración. En riego, se utiliza el término de eficiencia de uso del agua para determinar la productividad de los cultivos en función del agua evapotranspirada. El cuadro 5.5.1 muestra la eficiencia del uso de agua, EUA, para diferentes cultivos.

Cuadro 5.5.1 Eficiencia de uso de agua para diferentes cultivos

Cultivo	Kg/mm	Lugar	Referencia
Maíz	19.98	Davis, CA, USA	Stewart et.al, 1977
Maíz	12.34	Fort Collins, CO, USA	Stewart et.al, 1977
Maíz	11.74	Logan, UT, USA	Stewart et.al, 1977
Maíz	15.40	Barinas, Venezuela	Garavito
Maíz	16.30	Caimital, Venezuela	Personal
Maíz	13.40	Salvador	USU
Cebolla	63.00	Quíbor, Ven	Barahona, 1978
Frijoles (Pinto)	3.50	Logan, UT, USA	Stewart et.al, 1977
Caraota	3.64	Rep. Dominicana	Personal
Papa	100.00	Kimberly, ID, USA	Stewart et.al, 1977
Caña	100.00		S.S shih, 1986
Algodón (lint)	2.70	Australia	Stiller, 2001
Nabo	18.00	Australia	D. Gray, 1996
Girasol	5.27	USA	M. Ennen. 1979
Cebada	9.83	USA	M. Ennen. 1979
Maíz	13.60	USA	M. Ennen. 1979
Trigo	5.62	USA	M. Ennen. 1979
Soya	6.11	USA	M. Ennen. 1979
Remolacha az.	49.20	California, USA	Stephen Kaffka, 1996
Chile	39.50	USA	??
Tomate	75.00	Salvador	USU

6. Las Inter-relaciones.

Todas las relaciones pueden ocurrir simultáneamente y en consecuencia, es muy difícil medir todo lo que ocurre. El caso más complejo es el del riego. Cuando un cultivo se riega por superficie, por ejemplo, antes del riego está ocurriendo la redistribución de la humedad por causa de los potenciales de agua en el suelo; al mismo tiempo el cultivo está evaporando agua y tomando nutrientes. Durante el riego ocurre infiltración y movimiento de agua en el suelo y continúa la evaporación y toma de nutrientes por las raíces.

Es muy difícil analizar las Inter-relaciones separadamente y por tanto, es necesario recurrir a metodologías complejas, como los modelos de simulación, para poder estudiar el comportamiento de cada uno de los elementos de una manera continua o por eventos. En el anexo B se hará una descripción de algunos modelos de simulación aplicados utilizados en la actualidad.