

topográficas e inclusive humanas, cambian de un país a otro o de una región a otra. Por ello, siempre que se pretenda establecer o redistribuir una red de estaciones agrometeorológicas, es indispensable evaluar en forma cuidadosa las condiciones anotadas y luego sí buscar que las estaciones sean emplazadas en sitios representativos de dichas condiciones.

También es de interés expresar que existen diferencias en el comportamiento o distribución espacial de los diversos elementos meteorológicos, ya que, por ejemplo, los valores de la radiación solar global tienden a ser más estables a lo largo y ancho de una región dada que los de precipitación o temperatura mínima. Este hecho se debe tener en cuenta al analizar el instrumental o el programa de observaciones de cada estación. Sobre los criterios que se deben seguir para la distribución de una red agrometeorológica, la Guía de Prácticas Agrometeorológicas de la OMM, dice:

"Cuando se estalezca o se reorganice una red de estaciones agrometeorológicas, se debería tratar que estén debidamente representadas las principales regiones agrícolas del país. El número de estaciones dentro de cada región dependerá de la extensión de dicha región, los tipos y subtipos climáticos presentes y la variación espacial de factores tales como la vegetación natural, los principales cultivos y los métodos agrícolas. Tanto como sea posible, cada región homogénea desde el punto de vista fitogeográfico, debería estar representada al menos por una estación agrometeorológica principal. Similarmente, cada área agrícola o ganadera característica debería tener una estación agrometeorológica ordinaria. Las estaciones auxiliares se deberían instalar de manera que aseguren una densidad espacial adecuada de las observaciones de los elementos biometeorológicos de mayor importancia agrometeorológica en el país en cuestión".

3.4. Observaciones del ambiente físico

Las diferentes observaciones que se deben llevar a cabo en las estaciones agrometeorológicas han sido reguladas por la OMM y por ello tanto en esta sección, como en la siguiente (3.5 "Observaciones biológicas"), se resumirán- y en algunos casos se discutirán las normas que

dicha entidad detalla en la Guía de Prácticas Agrometeorológicas y la Guía de Instrumentos Meteorológicos y Prácticas de Observación (referencias bibliográficas Nos. 5 y 6 del capítulo).

El programa de las observaciones de cada estación agrometeorológica debe incluir la mayor parte posible de los siguientes elementos que caracterizan el ambiente físico:

- La temperatura y la humedad del aire
- El movimiento del aire
- El brillo solar y la radiación
- Los hidrometeoros y otros factores del balance hídrico
- La temperatura y la humedad del suelo

Dado que las observaciones relacionadas con parámetros tales como la temperatura y la humedad del aire, la velocidad y dirección del viento, el brillo solar, la precipitación y la evaporación, se realizan también en las estaciones climatológicas y sinópticas y que dicho tema es tratado a fondo en los cursos de observadores y personal clase IV, en este curso tales aspectos no serán analizados en forma detallada; por el contrario, las observaciones o mediciones de la humedad del suelo, la radiación solar, el rocío, la temperatura del suelo y la evapotranspiración, las cuales son características de las estaciones agrometeorológicas, serán objeto de una discusión más amplia en las secciones 3.6 a 3.10 de este capítulo.

3.4.1 La temperatura y la humedad del aire

A diferencia de las estaciones meteorológicas de otro tipo, en las estaciones agrometeorológicas es importante medir la temperatura y la humedad del aire a diferentes niveles en la capa próxima al suelo. La variación de tales elementos en dicha capa es de interés en especial en los estudios del microclima de las comunidades agrícolas. En las estaciones agrometeorológicas principales se deberían realizar aquellas mediciones desde la superficie del suelo hasta una altura de 10 metros sobre ella. En las estaciones ordinarias y auxiliares dichas observaciones se pueden limitar a los dos primeros metros sobre el suelo, que constituyen la capa en la cual se desarrollan numerosos cultivos.

Para estudiar el gradiente vertical de los elementos meteorológicos en cuestión en esa capa, se recomienda efectuar mediciones en por lo menos tres niveles, los cuales se pueden seleccionar de las siguientes alturas 5, 10, 20, 50, 100, 150, y 200 cm. En lo posible las mediciones mencionadas se deberían realizar mediante equipo termoelectrónico (p. ej. termopares o resistencias) con sus respectivos registradores. Cuando ello no sea factible, se aconseja entonces obtener los valores de las temperaturas extremas (máxima y mínima) en tres niveles distintos, los que deberían incluir 5 y 200 cm. En el caso de la humedad relativa, la alternativa es la utilización de psicrómetros ventilados.

Un instrumento de especial interés para fines agrometeorológicos (y que está relacionado con lo expresado hasta ahora), es el llamado "termómetro de mínima sobre césped" o "termómetro de radiación terrestre", al cual se usa principalmente para obtener información sobre las ocurrencias eventuales de heladas (o simplemente temperaturas muy bajas) a nivel del suelo, durante las noches. Es un termómetro ordinario de mínima que se expone horizontalmente sobre césped corto, con su bulbo tocando ligeramente las puntas o bordes vegetales. Se recomienda levantarlo en las horas diurnas para evitar problemas por condensación o freccionamiento a lo largo de la columna del instrumento.

3.4.2 El Viento

En las diversas estaciones agrometeorológicas se deberían realizar mediciones u observaciones en forma regular, de la velocidad y la dirección del viento. Para facilitar la comparación de los datos con los de otras estaciones, se recomienda adoptar como nivel de referencia, la altura de 10 metros.

Un dato de importancia en los estudios de evapotranspiración potencial y balances hídricos, es la velocidad media del viento a 2 m sobre el suelo, la cual se puede calcular a partir de la información suministrada por un anemómetro totalizador o de recorrido colocado en dicho nivel. Por ello el uso de este instrumento se ha incrementado en los últimos años en las estaciones agrometeorológicas.

3.4.3 El brillo solar y la radiación

En todas las estaciones agrometeorológicas se deben obtener registros sobre la duración del brillo solar, los que es necesario acompañar de registros de la radiación solar.

En las estaciones principales se deberían también adelantar mediciones de la radiación neta, la radiación difusa y la global, así como de la distribución espectral de la radiación. Este aspecto será tratado con mayor detalle en la sección 3.6, en la que se describirán los instrumentos utilizados con esos fines.

3.4.4 Los hidrometeoros y otros elementos del balance hídrico

Se deberían efectuar observaciones de los siguientes hidrometeoros: la lluvia y la llovizna (incluyendo intensidad), el granizo (especificándose el tamaño o diámetro de los trozos de hielo), el rocío, la niebla, la neblina, etc. Asimismo, son importantes las observaciones sobre la nubosidad (cantidad total de nubes) y el estado del suelo.

Otros elementos de importancia que se miden en las estaciones agrometeorológicas son la evaporación y la evapotranspiración, los cuales son vitales en los estudios relacionados con los balances hídricos y los requerimientos de agua de los cultivos. Para las mediciones de evaporación se utiliza corrientemente el tanque de clase A. La medición del rocío se discutirá con mayor amplitud en la sección 3.7 y la de evapotranspiración en la sección 3.10 de este capítulo.

Asimismo, las observaciones de la temperatura y la humedad del suelo se comentarán en los apartes 3.8 y 3.9 respectivamente.

3.5. Observaciones de carácter biológico

Las observaciones biológicas constituyen medidas cualitativas o cuantitativas de las respuestas de las plantas y los animales a las condiciones del tiempo atmosférico. Son útiles para lograr un mejor entendimiento de las relaciones existentes entre el tiempo y diferentes aspectos de la agricultura.

El reglamento técnico de la OMM (8) menciona las siguientes observaciones de carácter biológico que deben estar comprendidas en los programas de trabajo de las estaciones agrometeorológicas:

3.5.1 Observaciones fenológicas. Se relacionan con la ocurrencia de eventos periódicos en plantas y animales, los cuales se asocian con las variaciones del estado del tiempo. Mediante estas observaciones se registran las fechas en las cuales ocurren acontecimientos periódicos tales como las fases de desarrollo de los cultivos (floración, fructificación, etc), las migraciones de algunas especies animales, la aparición de ciertas plagas y enfermedades vegetales, etc.

3.5.2 Observaciones del crecimiento.

3.5.3. Observaciones sobre el rendimiento cualitativo y cuantitativo de los productos vegetales y animales.

3.5.4 Observaciones de los daños directos del tiempo en cosechas y animales (efectos perjudiciales de las heladas, el granizo, las sequías e inundaciones, etc).

3.5.5 Observaciones de la aparición y los daños causados por enfermedades y plagas.

3.6. Medición de la radiación

Los principales aspectos relacionados con la radiación solar, terrestre y atmosférica fueron tratados en el capítulo I de este Curso: "Balancede Radiación". Se discutirán a continuación los tópicos más importantes sobre la medición instrumental de la radiación.

3.6.1 Clasificación de los instrumentos utilizados para la medición de la radiación. La siguiente es la clasificación adoptada por la OMM:

3.6.1.1. Pirheliómetro: instrumento para medir la intensidad de la radiación solar directa en un ángulo normal de incidencia.

3.6.1.2. Piranómetro: es el instrumento que se utiliza para medir la radiación solar recibida de todo el hemisferio. Mide la radiación solar global y difusa.

3.6.1.3. Pirgeómetro: Se usa para medir la radiación de onda larga en una dirección (incidente o saliente). Una de sus principales aplicaciones se relaciona con la medición de la radiación terrestre efectiva.

3.6.1.4. Pirradiómetro: Sirve para medir el conjunto de la radiación solar y terrestre.

3.6.1.5. Pirradiómetro neto o de neta: Es aquel instrumento usado para la medición del flujo de radiación total ascendente y descendente. Mide por consiguiente la radiación neta.

3.6.2 La precisión de las mediciones de radiación

La precisión del sistema completo de medición de la radiación (incluyendo el equipo de registro o de integración); depende principalmente de los siguientes factores:

- a) La sensibilidad del sistema, o sea el cambio más pequeño en la cantidad que se está midiendo que puede ser detectada por el sistema.
- b) La estabilidad del factor de calibración, o sea el cambio máximo que puede ocurrir en este factor, en porcentaje por año
- c) El error máximo debido a la variación en la temperatura del ambiente.
- d) La constante de tiempo del sistema o sea el tiempo que se necesita para registrar un cambio súbito en radiación.
- e) La respuesta del coseno o sea el grado de desviación en la respuesta direccional del sensor respecto a aquella que se se ha asumido. La intensidad de la radiación en cualquier ángulo debe ser proporcional al coseno del ángulo entre el rayo o haz lumínico y una perpendicular a la superficie receptora.

De acuerdo a las anteriores consideraciones, existe una clasificación especial de los instrumentos de radiación según su precisión, la cual los divide en instrumentos standard o patrones y de primera, segunda o tercera categoría.

3.6.3 Medición de la radiación solar global

De acuerdo a lo anotado en 3.6.1.2. la radiación global se mide con los piranómetros, instrumentos que se deben instalar bajo condiciones óptimas de exposición o sea sin obstáculos que interfieran las mediciones sobre el plano del instrumento. Algunos de los principales son los siguientes:

3.6.3.1. El piranómetro Moll-Görzyski.

El elemento sensible de este instrumento consta de una serie de tiras muy delgadas de manganina (aleación de cobre, manganeso y níquel) y constantán (aleación de cobre, níquel y zinc), las que poseen una serie de uniones a lo largo de la línea de central de su superficie y otras uniones en contacto térmico con unos "postes" masivos que están aislados eléctrica pero no térmicamente de la placa de la base (véase figura 3.1.). Cuando se incrementa la temperatura de la superficie receptora se genera una fuerza electromotriz que se mide con un galvanómetro o un potenciómetro. El órgano sensible se recubre con laca negra especial.

La superficie receptora está cubierta por dos domos o cúpulas concéntricas de vidrio de 2 mm de espesor, las cuales protegen al sensor del viento y la precipitación. La base del instrumento (por debajo del sensor) se protege de la radiación solar directa por medio de una placa protectora circular, la cual está al nivel del sensor. De este modo, la temperatura del conjunto del instrumento es igual o muy próxima a la del aire circundante y permanece más uniforme que si estuviese sometido al efecto directo de la radiación.

El instrumento tiene un 98% de respuesta total en 30 segun-

3.6.3.2. El piranómetro Eppley espectral de precisión.

Es uno de los instrumentos más preciosos para la medición de la radiación global en forma integral o en determinadas bandas de longitudes de onda (ver figura 3.2).

Su órgano sensible consiste de una pila termoelétrica circular de uniones múltiples de cobre-constantán, las que están entorchadas o enrolladas entre sí. El aparato puede soportar vibraciones o golpes severos.

El sensor es recubierto con una capa de laca negra de Parsons. El instrumento está provisto con un par de domos removibles, de vidrio óptico de precisión Schott. Los hemisferios con los cuales viene normalmente provisto el aparato son transparentes a longitudes de onda entre 0,265 y 2,8 micrones. Sin embargo, se pueden utilizar cúpulas con selectividad para algunas longitudes de onda.

3.6.3.3. El actinógrafo bimetalico del tipo Robitzch.

Este tipo de piranómetro, también conocido como "piranógrafo mecánico", emplea como órgano sensible un conjunto de pequeñas láminas bimetalicas similares, con la única excepción de que unas están recubiertas con pintura blanca especial y otras con pintura o laca negra. Las diferencias de color producen diferencias en la absorción de la radiación incidente, lo que a su vez determina variaciones en el calentamiento y la deformación de las láminas. Estas diferencias son transmitidas por un juego de palancas a la plumilla o pluma Inscriptora.

El conjunto de elementos sensibles, de transmisión y de registro, va encerrado en una caja que tiene cierre hermético. Una cúpula transparente, situada en la parte superior del aparato, permite el paso de la radiación incidente.

Este instrumento presenta problemas por las variaciones de las constantes de calibración en función de los ángulos acimutal y de elevación solar, por la fricción de la pluma sobre la banda de registro y por el lento tiempo de respuesta (10-15 minutos para el 98% de respuesta) dada la masa relativamente grande las láminas. También pueden ocurrir variaciones en las mediciones por el efecto de la temperatura.

3.6.4. Medición de la radiación solar difusa

La radiación difusa se mide con un piranómetro corriente de los que se utilizan para la medición de la radiación solar global, pero con la adición de un anillo protector especial que impide que la radiación directa llegue al sensor (fig.3.3) Dado que en un día despejado la radiación difusa puede ser inferior a una décima parte de la radiación global, se requieren registradores más sensibles para detectar las diversas fluctuaciones de la radiación difusa (6).

El anillo protector u "obstructor" contra la componente directa de la radiación solar, se instala de modo que se pueda luego deslizar libremente a lo largo de un eje polar. De este modo, el anillo se ajusta a través del año de acuerdo al ángulo de declinación solar. Asimismo, existe una escala de latitud, la cual se ajusta de acuerdo a la latitud del lugar.

Por otra parte, el anillo descrito intercepta también una pequeña parte de la radiación difusa, además del "eclipsamiento" que efectúa sobre el disco solar, por lo que se deben realizar correcciones a los valores obtenidos con el aparato. Estas correcciones en general se llevan a cabo aumentando ligeramente los valores, según computos especiales, para compensar la radiación difusa interceptada por el anillo.

3.6.5. Medición de la radiación solar directa

Tal como se expresó en 3.6.1.1., la radiación solar directa se mide con el pirheliómetro, instrumento en el cual el elemento sensible se dispone de modo que siempre esté perpendicular a una línea imaginaria que conecte el sol al receptor. El aparato posee una serie de diafragmas que permiten solo el paso de la radiación directa al sensor y va colocado sobre una base especial que facilita un pronto ajuste de acuerdo a los ángulos de devación y azimut del sol.

Para ilustrar en mejor forma este tipo de instrumentos, se describirá a continuación uno de los utilizados con mayor frecuencia.

3.6.5.1 El pirheliómetro Eppley de incidencia normal.

El elemento sensible de este instrumento es una termopila de platibismuto, recubierta de negro especial 3M. La termopila se instala en la base de un tubo metálico que apunta hacia el sol y cuya apertura guarda una relación con la longitud de 1 a 10. El interior del tubo es negro y posee varios diafragmas que "pasan" la radiación directa al sensor. En su extremo superior posee una rueda o disco giratorio en el cual se pueden acomodar tres filtros (tales como los Schott OG1, RG2, RG8) para efectuar mediciones en diferentes bandas del espectro solar (Ver fig. 3.4).

Para lecturas periódicas el pirheliómetro se coloca en una montura que se ajusta según la elevación y el azimuth solar. Para registros continuos, el instrumento se coloca en una base ecuatorial mandada o dirigida a potencia (en forma eléctrica) que permite el seguimiento continuo del sol a lo largo del día.

El tubo posee dos pestañas o rebordes - uno en la parte superior y otro en la inferior - que están dispuestos de modo que cuando el aparato está orientado en forma correcta un haz de luz solar penetra por un orificio muy pequeño que existe en el reborde superior y cae directamente sobre un punto negro que se ha grabado en el reborde inferior.

3.6.6 Medición de la radiación neta

Los instrumentos que se utilizan para medir la radiación neta se denominan pirradiómetros netos o de neta. Se les divide en dos clases principales: los pirradiómetros netos de placa, sin protección, los que poseen dos superficies receptoras libremente expuestas y los pirradiómetros netos con sus superficies receptoras protegidas por cúpulas semejantes a las que recubren los piranómetros. Los pirradiómetros netos de placa presentan problemas de diversa índole, entre los cuales se pueden mencionar: a) cuando sus superficies se mojan, ya sea por causa de la lluvia o el rocío, tienden a actuar como bulbos húmedos y a dar información falsa; b) tales superficies receptoras se deterioran con relativa rapidez, lo cual también produce información distorsionada; c) la ventilación que llega a las dos superficies debe ser uniforme, pero esto se altera con el tiempo si no se vigila de cerca. Por todo ello el aparato requiere frecuentes calibraciones y su uso en la práctica ha disminuído.

3.6.6.1. El pirradiómetro neto Middleton.

Mide la diferencia existente entre los flujos de radiación descendentes y ascendentes, en todas las longitudes de onda. En general consiste de un elemento sensible del tipo termopila, encerrado entre dos domos de polietileno inflados.

El sensor se compone de 250 uniones de cobre-constantán que forman una termopila dispuesta entre dos pequeñas placas negras (superior e inferior).

Los hemisferios de polietileno son transparentes tanto a la radiación de onda corta como a la de onda larga y se inflan con aire seco o nitrógeno. Los domos se reemplazan periódicamente (cada dos o tres meses) ya que el desgaste incide en respuestas diferentes a la inicial.

3.7. Medición del rocío

Una definición precisa del rocío ha sido dada por Long, citado por Chang (9), quien expresa que el rocío es la deposición de gotas de agua por condensación directa del vapor de agua del aire claro adyacente, en general sobre superficies enfriadas por la radiación nocturna. La medición del rocío es importante en especial en los estudios de enfermedades vegetales y en las zonas áridas y semi-áridas como componente del balance hídrico.

La cantidad de rocío que se deposita en una superficie dada y en un período determinado se expresa usualmente en kilogramos por metro cuadrado, gramos por centímetro cuadrado o su equivalencia en milímetros de rocío. Tal cantidad depende, no obstante, de las propiedades de la superficie (incluyendo su tamaño), por lo que los resultados obtenidos con diversos instrumentos no siempre son representativos del rocío que se ha depositado en los objetos naturales (6).

Uno de los métodos más utilizados ha sido el de Duvdevani, que consiste en un bloque de madera rectangular recubierto con una pintura roja especial, el que se expone a una altura estandar sobre el suelo al empezar la noche. El tamaño, la distribución y la forma de las gotas de rocío sobre la superficie superior del bloque se comparan en la mañana siguiente con una serie de fotografías estandar de la superficie del bloque cubierta con rocío de diferentes pesos, y de allí se deduce la cantidad de rocío depositado en la noche en cuestión.

Los valores así encontrados son aproximados y por ello solo son relativamente correctos para totales mensuales y anuales (10). Los principales méritos de este método son su sencillez y los bajos costos, lo cual posibilita su uso extensivo. Por el contrario, el aparato no permite obtener medidas precisas para noches individuales, no sirve para conocer la duración del rocío y la relación entre el rocío depositado en las superficies naturales y el rocío registrado por el instrumento, es bastante incierta.

Entre los otros métodos existentes se destaca el uso de la balanza registradora, el cual se discutirá a continuación.

3.7.1. La balanza registradora de rocío según Hiltner

También llamada el rociómetro registrador o drosómetro del tipo Hiltner, el instrumento se compone básicamente de un tamiz en el cual se deposita el rocío, de una balanza que pesa la cantidad depositada y de un sistema registrador (fig. 3.5).

El tamiz está colgado del brazo de la balanza del aparato, pero protegido contra el efecto del viento por un cilindro protector. Los movimientos del brazo de la balanza se transmiten, ampliados en forma apreciable, al brazo registrador que tiene una plumilla en su extremo; esta plumilla efectúa los trazos respectivos en una gráfica superpuesta en un tambor registrador convencional. Las gráficas vienen usualmente dispuestas para mediciones desde 0 hasta 5 gramos, con 100 divisiones o sea para registrar hasta 1/20 gr. Los registros pueden ser diarios o semanales. El tamiz recolector del rocío es muy denso y tiene una superficie de 100 cm².

3.6.- Medición de la temperatura del suelo:

La temperatura del suelo es un elemento de especial importancia en el campo de la meteorología agrícola y entre las aplicaciones que tiene este tipo de información se destacan las relacionadas con las épocas y profundidades de siembra de diferentes cultivos, los estudios de algunas plagas y enfermedades que se desarrollan en el suelo, los estudios sobre germinación y crecimiento de las plantas, todas las investigaciones relacionadas con el sistema radicular de los vegetales, etc. La Organización Meteorológica Mundial ha estipulado que en las diferentes estaciones agrometeorológicas se deben efectuar mediciones de la temperatura del suelo en las siguientes profundidades: 5, 10, 20, 50 y 100 cm (5,6).

En los niveles más profundos (50 y 100 cm) la temperatura cambia lentamente y por ello a esas profundidades se puede efectuar una sola observación diaria. En los otros niveles las observaciones se deberían realizar, en orden de prioridad, mediante registros continuos (con geotermógrafos), observaciones de la máxima y la mínima diaria o a través de lecturas que se efectúen a horas fijas y en lo posible a intervalos no mayores de 6 horas (5).

En las diferentes mediciones de la temperatura del suelo se suelen emplear termómetros de mercurio. Para profundidades de 5, 10, y 20 cm, los geotermómetros acodados (fig. 36) son los más convenientes, ya que sus escalas se pueden leer en forma directa, in situ, sin que se originen las interferencias que ocurren cuando se mueven los geotermómetros de su lugar normal de medición. Los bulbos de estos instrumentos se entierran a la profundidad deseada y una parte de la columna, con la escala apropiada, queda en el exterior en forma horizontal o con diversas inclinaciones.

Al instalar estos termómetros se debe prestar atención a dos hechos importantes (10):

- a) La parte acodada no debería quedar bajo ninguna presión extraña ya que el termómetro es muy débil en este punto.
- b) Se debería remover el suelo tan poco como sea posible para que las lecturas sean verdaderamente representativas de las condiciones reales del suelo en las cercanías.

Por otra parte, en las lecturas de los geotermómetros acodados se debe tener especial cuidado de no cometer errores de paralaje en el momento de efectuar las observaciones.

Para efectuar las mediciones a profundidades de 50 y 100 cm, se recomiendan los geotermómetros suspendidos dentro de tubos metálicos, los cuales se entierran a los niveles deseados. En este caso los termómetros van recubiertos por un tubo de vidrio fuerte y este conjunto se suspende dentro de un tubo especial (usualmente de acero dulce o suave), por medio de una cadena que cuelga de la tapa que cierra la parte superior del tubo (figura 3.7).

El bulbo de estos geotermómetros viene recubierto por parafina sólida que hace que el termómetro responda lentamente a los cambios de temperatura y por consiguiente asegura que no ocurrirán cambios en la lectura mientras el termómetro se retira del tubo para efectuar la observación en el exterior.

Por otra parte, la porción superior del tubo, por encima de una pestaña o saliente indicadora, queda sobre el suelo para evitar posibles escurrimientos de agua hacia el interior del instrumento.

La presencia del tubo metálico en el suelo tiende a modificar la temperatura del suelo circundante en alguna proporción, en virtud a que la conductividad térmica del tubo de metal es mayor que la del suelo. No obstante, la magnitud de este efecto es muy pequeña y en general inferior a $\pm 1^{\circ}\text{C}$ (10).

3.9. Medición de la humedad del suelo

Es este uno de los elementos más importantes en los estudios o trabajos relacionados con el balance hídrico, los calendarios agrícolas, algunas plagas y enfermedades vegetales y animales, la asimilación de nutrientes por las plantas, la ocurrencia de temperaturas extremas dañinas para los cultivos, etc., y por ello la OMM recomienda su medición en las estaciones agrometeorológicas.

La determinación de la humedad del suelo se debería efectuar a diferentes profundidades, en especial en aquellas de mayor actividad radicular y a intervalos regulares de tiempo (p. ej. cada siete o diez días), de acuerdo a los objetivos en cada caso.

Existen en general cuatro técnicas o métodos principales para determinar la humedad del suelo:

- a) El método gravimétrico o de laboratorio
- b) El método basado en la resistencia eléctrica
- c) El método tensiométrico
- d) Con el dispersor de neutrones

A pesar del método que se utilice, en todos los casos es necesario efectuar determinaciones en diferentes puntos del área bajo estudio, en razón a la variabilidad que tiene la humedad del suelo tanto en superficie como en profundidad. El número de mediciones (o muestras) que se deben realizar en cierta área, dependen de la exactitud buscada y de las eventuales diferencias existentes en cuanto a relieve, suelo y tipos de cultivo.

Los cuatro métodos mencionados antes tienen todos sus ventajas y desventajas relativas, las cuales se analizarán para cada caso.

3.9.1. El método gravimétrico

En este método el contenido de humedad del suelo se determina a partir del peso de muestras de suelo desecadas en estufas especiales. El procedimiento general consiste en tomar diversas muestras del suelo, llevarlas a un laboratorio donde se pesan tal como vienen del campo, se desecan luego en estufas especiales a temperaturas de 100° - 105°C y se vuelven a pesar, tras lo cual es posible conocer el contenido original de humedad de las muestras.

En efecto, en este caso el contenido de humedad se toma como la relación existente entre el peso de la muestra sin secar y el peso de la muestra seca, expresado en porcentaje.

Cuando se extraen las muestras del suelo, se debería tener cuidado para que las muestras no pierdan ni ganen humedad en los procesos de extracción o transporte al laboratorio. Para ello es necesario que el paso de las muestras a los recipientes de transporte y el pesaje de aquellas se realicen con la mayor prontitud e igualmente que durante el transporte las muestras estén aisladas del exterior en forma tal. El método gravimétrico es bastante preciso y permite conocer en forma directa el contenido de humedad de los suelos en cuestión, por lo cual se le utiliza como método patrón. Así mismo, se puede aplicar en todo tipo de suelo, con excepción de algunos muy pedregosos o rocosos. No obstante lo anterior, este método no permite que se efectúen mediciones regulares en el mismo lugar y por ello se requieren numerosos muestreos y un campo amplio y homogéneo. También se debe anotar que para tomar las muestras periódicas se precisa de personal disponible para el efecto y que los resultados no se pueden conocer en el mismo día..

3.9.2. El método basado en la resistencia eléctrica

En este caso la humedad del suelo se determina a través de los cambios en la resistencia eléctrica de una unidad - de yeso, nylon o fibra de vidrio - a la que se fijan dos electrodos. La unidad se entierra a la profundidad deseada y pronto entra en equilibrio higrométrico con el suelo; las variaciones subsecuentes de humedad ocasionarán a su vez, variaciones en la resistencia eléctrica de la unidad las cuales se miden en un instrumento instalado en la superficie (4). (figura 3.8).

Los valores de resistencia eléctrica se convierten luego, mediante una curva de calibración, en valores del contenido de humedad del suelo; la curva de calibración se obtiene correlacionando los valores de resistencia eléctrica de diversas muestras del suelo bajo estudio, con los valores correspondientes de humedad obtenidos por el método gravimétrico.

Las unidades, o elementos sensibles, se construyen de modo que los electrodos queden recubiertos completamente por el material absorbente utilizado (yeso, nylon, fibra de vidrio). Es necesario calibrar cada unidad utilizada, para cada tipo de suelo, mediante el método gravimétrico.

Este método presenta varias ventajas, entre las que se pueden mencionar: a) el bajo costo de las unidades; b) la posibilidad de utilizar numerosas unidades en diferentes lugares y profundidades, pudiéndose determinar todas sus resistencias eléctricas con un solo instrumento medidor; c) la gran rapidez con que se efectúan las mediciones; d) la factibilidad de realizar mediciones regulares en el mismo lugar y e) la cobertura que permite obtener de los diferentes rangos de contenido de humedad.

No obstante, también tiene serlas: desventajas, a saber: a) es difícil obtener una calibración estable adecuada para un grupo de unidades; b) existe un pronunciado efecto de histéresis en las unidades; c) se requiere frecuentes calibraciones y determinaciones de algunas características físicas y químicas del suelo para establecer la exactitud de las mediciones.

3.9.3. Método tensiométrico

El tensiómetro es un instrumento que consiste de una unidad porosa (usualmente de cerámica) que se conecta por medio de un tubo a un manómetro en el cual se determina la presión o tensión a la cual está sujeta el agua en la unidad porosa (fig. 3.9).

El aparato se llena de agua y una vez instalado en el suelo, se establece un contacto hidráulico entre la unidad porosa y el suelo.

En efecto, cuando el suelo se seca, succiona el agua de la cerámica porosa y dentro del sistema se crea una tensión que aumenta a medida que el suelo se seca. Cuando el suelo se humedece por la lluvia o el riego, se invierte el sentido de la succión y el agua fluye de nuevo al interior de la cerámica porosa; la lectura del tensiómetro entonces desciende. (11).

Las mediciones tensiométricas se realizan con el fin de determinar el estado energético del agua en el suelo (retención de agua) y dichas mediciones se pueden correlacionar con el agua disponible para la planta. No son tan estables, sin embargo, las correlaciones existentes entre la tensión y el contenido de agua en el suelo, ya que ellas dependen de la textura y la estructura de cada suelo, aparte que las curvas de humedecimiento y desecación del suelo son diferentes.

No obstante lo anterior, no es necesario expresar la tensión del agua del suelo en términos de contenido de agua, ya que un mismo contenido de agua suele tener efectos muy diferentes sobre determinado cultivo en distintos suelos.

Las principales aplicaciones de las mediciones tensiométricas son las siguientes:

- a) Para la determinación de regimenes de riego
- b) Para el control de caudales asignados a diferentes cultivos
- c) En el riego automático
- d) Para la medición de las fluctuaciones en la capa freática
- e) En la medición del movimiento del agua dentro de terrenos salinos.

Por ejemplo, algunas tensiones óptimas para obtener óptimos rendimientos en suelos profundos, fértiles y bien drenados son, según Taylor citado por Cornat y Goldberg (11):

<u>Cultivo</u>	<u>Tensión (centibars)</u>
Lechuga	40-60
Zanahoria	55-65
Papa	30-50
Maíz	50-100
Limón	40
Maranja	20-100
Uva	40-100

El uso de los tensiómetros para otras aplicaciones agrícolas se ve limitado por el rango de sensibilidad del instrumento. En efecto, cuando se alcanzan tensiones mayores a 0.9 atmósfera, entra aire al aparato y no se pueden obtener más lecturas.

Por ello, la mayoría de instrumentos vienen graduados para mediciones entre 0 y 100 centibars de succión.

Los tensiómetros son sensibles a los cambios de temperatura, ya que los gradientes térmicos entre la superficie del suelo y la unidad porosa pueden ocasionar variaciones en los valores medidos. Para obviar esto se recomienda efectuar las lecturas a la misma hora cada día, preferiblemente a primera hora.

El efecto de histéresis en los tensiómetros es grande y el instrumento tiende a indicar un valor más elevado de tensión (para una determinada humedad) cuando el suelo se está secando que cuando se está humedeciendo. Esto no constituye un problema muy grave en los casos en que el suelo está ganando ~~humedad~~ humedad, ya que estos suelen ser procesos breves, en comparación con los procesos de desecación.

Gran parte de los inconvenientes que presentan los tensiómetros se derivan de la interferencia del aire que penetra a la unidad porosa y al tubo o cuerpo del aparato, sobre las mediciones. Este problema se ha resuelto en algunos modelos recientes, empleando un sistema llamado "Jet Fill", con el que se pueden remover el aire acumulado internamente mediante un sistema especial de vacío incorporado. En este caso el vacío se obtiene al oprimir un botón que acciona una pequeña bomba extractora de aire localizada en la parte superior del instrumento. (véase la fig. 3.9).

3.9.4. Método del dispersor de neutrones

El método se basa en la medición de la disminución de la velocidad de los neutrones irradiados al suelo por una fuente de neutrones rápidos (4). En este caso, los neutrones rápidos entran en colisión con los núcleos de los átomos de hidrógeno presentes en las moléculas de agua que hay en el suelo y dicha colisión disminuye la velocidad de aquellos neutrones. De este modo, el conteo de los neutrones lentos detectados por un contador especial, sirve para determinar la cantidad de hidrógeno existente en el suelo circundante y con ello el volumen de agua, ya que esta es la única fuente significativa de hidrógeno en el suelo.

A través de este método se obtiene la cantidad de agua existente por unidad de volumen de terreno y es considerado como uno de los más precisos para determinar la humedad del suelo insitu, o sea en un mismo lugar en forma continua.

Antes de efectuar las mediciones, es necesario enterrar tubos de acceso en los sitios de interés, en las profundidades máximas deseadas. Estos tubos son generalmente de aluminio o de acero inoxidable y tienen un diámetro ligeramente superior al de la sonda emisora de neutrones rápidos. Los tubos se deben enterrar de modo que exista un contacto muy bueno con el suelo circundante, para asegurar que las características del agua en esa porción de suelo son iguales a las de los alrededores.

Asimismo, se debe efectuar una calibración previa de las lecturas del dispersor vs. el contenido de humedad en el suelo determinado por el método gravimétrico. Para ello, se instala un tubo de acceso en forma temporal cerca del sitio definitivo en el cual se efectuarán luego las lecturas y se procede a realizar las mediciones con el dispersor en cada una de las profundidades deseadas, dentro del tubo.

En forma simultánea se toman muestras del mismo suelo en torno al lugar donde se ha instalado dicho tubo y se determina su contenido de humedad en el laboratorio. Esto se debe repetir bajo diferentes condiciones de humedad en el suelo.

Una vez se inicia el programa regular de mediciones, se baja la sonda (o emisor de los neutrones rápidos) en cada tubo de acceso dispuesto para el efecto y se efectúan determinaciones en cada profundidad prevista. Los tubos de acceso se pueden dejar en forma indefinida en los lugares previstos.

Las mediciones se pueden llevar a cabo a cualquier profundidad (el cable que une la sonda al bloque del aparato así lo permite), con excepción de los primeros 20 cm. de suelo, ya que entre la superficie y dicho nivel los neutrones alcanzan a escapar a la atmósfera y se registran lecturas poco confiables.

Entre las ventajas de este método se pueden mencionar su precisión y rapidez de medición, así como el hecho de que los conteos se pueden relacionar fácilmente con el contenido volumétrico de agua en el suelo. Igualmente, es posible realizar mediciones en un mismo lugar durante un largo período, sin causar alteraciones de consideración en el suelo.

Como desventajas relativas se encuentran el alto costo del instrumento, las adecuadas facilidades de electrónica que deben existir para un buen mantenimiento y la disponibilidad de operarios diestros debido a los riesgos (bajos) que conlleva el manejo de cualquier instrumento que emite radiaciones.

3.10. Medición de la Evapotranspiración.

La evapotranspiración es un elemento de gran importancia en todos los estudios o programas relacionados con el balance hídrico de un área cultivada, tales como los que tienen que ver con el riego y el drenaje.

Precisamente el objetivo del siguiente capítulo de este Curso es el estudio del balance hídrico y sus aplicaciones agrícolas, pero es necesario adelantar que la evapotranspiración es un proceso combinado que cubre tanto la evaporación de todas las superficies como la transpiración de las plantas. A este elemento se le suele tomar como un indicador de las necesidades de agua de los cultivos en sus diferentes fases y de ahí surge la importancia de su medición.

Los instrumentos que se utilizan para medir la evapotranspiración se conocen corrientemente como lisímetros. Algunos autores designan a los aparatos en los que el contenido de agua se mantiene a capacidad de campo con el nombre de evapotranspiración.

En general los lisímetros son grandes tanques que contienen suelo y vegetación y en los que las pérdidas de agua se miden por diferencias en peso (lisímetros de pesaje o gravimétricos) o por las diferencias existentes entre el agua que recibe el aparato y la que fluye por su parte inferior a un punto de medición externo (lisímetros de drenaje).

En general se deben tener en cuenta los siguientes aspectos relacionados con la instalación en el campo del instrumento:

- a) El lisímetro debería ser lo suficientemente grande y profundo para reducir al mínimo las diferencias con el medio circundante y para no restringir el crecimiento de las raíces dentro del mismo. Se ha estimado que para cultivos cortos (p. ej. pastura) el volumen del tanque debería ser superior a 1 metro cúbico, mientras que para cultivos de porte alto, dicho volumen debería superar los 4 metros cúbicos (9).
- b) El suelo dentro del lisímetro no debería ser alterado en relación con el suelo de los alrededores y en su superficie debería crecer vegetación típica del área circundante, conservándose igual densidad y altura a la de dicha vegetación.
- c) Se debería establecer un "área protectora" alrededor del lisímetro, la cual se mantiene con las mismas condiciones de humedad y cultivo, para minimizar el efecto de una eventual transferencia horizontal de calor desde áreas cercanas con condiciones diferentes.

La mayoría de los lisímetros utilizados en los diferentes países para efectuar mediciones de la evapotranspiración son de drenaje y a ellos nos referimos a continuación.

Los lisímetros de drenaje operan en base a principio de que la evapotranspiración registrada en el aparato es igual a la cantidad de lluvia e irrigación aportadas menos el agua lixiviada.

Dado que la percolación es un proceso lento, estos lisímetros son precisos sólo para períodos medianos o largos. De este modo, sus datos se suelen utilizar (para fines operativos) a nivel decádico o superior (para períodos de 10 o más días y para fines de publicación, aquellos se deberían presentar a nivel mensual).

Dentro de este tipo de lisímetros, uno de los más conocidos es el evapotranspirómetro tipo Thornthwaite, el cual se compone básicamente del tanque principal - en el que crece el cultivo respectivo - y de otros dos recipientes (alejados del tanque principal) en los cuales se recoge y se mide el agua que fluye por la parte inferior o base de aquel.

Los evapotranspirómetros tipo Thornthwaite se utilizan para medir la evapotranspiración potencial (véase su definición en el siguiente capítulo) y por ello el aparato se debe regar regularmente cuando no llueve, para mantener el suelo a capacidad de campo.

3.11. Bibliografía del Capítulo

- 1.- Food and Agriculture Organization of the United Nations. 1976. Irrigation and drainage paper No. 27: Agrometeorological field stations. By J. Doorenbos. Roma.
- 2.- Instituto Colombiano, de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras. 1976. Publicación aperiódica No. 39: Red meteorológica de Colombia. Por Eufasio Bernal D. Bogotá.
- 3.- Monteith, J.L. (compiled by). 1972. Survey of instruments for micrometeorology. Blackwell Scientific Publications. Oxford, London.
- 4.- Organización Meteorológica Mundial. 1970. Guía de Prácticas Hidrometeorológicas. 2a. edición. OMM. No. 168. TP. 82. Ginebra
- 5.- World Meteorological Organization. 1963. Guide to Agricultural Meteorological Practices. WMO. No. 134. TP. 61 Geneva.
- 6.- World Meteorological Organization. 1971. Guide to Meteorological Instrument and Observing Practices. Fourth edition. WMO. No. 8 TP. 3 Geneva.
- 7.- World Meteorological Organization. 1972. Agricultural Meteorological. Proceedings of the WMO Seminar on Agric. Met; Barbados, November 1970, WMO No. 310 Geneva.
- 8.- Organización Meteorológica Mundial. Edición de 1971. Reglamento Técnico. OMM NO. 49.
- 9.- Chang, J.H. 1971, Climate and Agriculture. And Ecological survey. Aldine Publishing. Company, Chicago.
- 10.- Her Majesty's Stationery Office. Air Ministry. Meteorological office. 1956. Handbook of meteorological instruments. Part I. Instrumentes for surface observations. London.

- 11.- Gornat, B. y Goldberg, S.D. 1975. El uso de tensiómetros para medir la tensión del agua del suelo y determinar el régimen de riego. Centro Regional de Ayuda Técnica, Agencia para el Desarrollo Internacional (A.I.D.) México/Buenos Aires.

CURSO DE AGROMETEOROLOGIA

CAPITULO IV

EL BALANCE HIDRICO

J. FRANCISCO BOSHELL M.Sc.

CONSULTOR O.M.M/PNUD.

1.- IMPORTANCIA

En el capítulo I se anotó que la agricultura se puede considerar como la explotación de la energía solar por parte de las plantas apoyada por un a adecuado suministro de agua y nutrientes que permitan mantener el crecimiento vegetal, La anterior definición refleja la gran importancia que tiene para los cultivos un suministro de agua de acuerdo a sus requerimientos. En efecto, una eventual escasez o un posible exceso hídrico en cualquiera de las fases de desarrollo de los cultivos, pueden causar pérdidas parciales o totales en las cosechas.

El balance hídrico permite establecer las ganancias y las pérdidas de agua que registran en un área dada, lo cual es útil para los siguientes fines:

- a) Para la planeación y la operación adecuada de riego y el drenaje de los campos agrícolas.
- b) Para la planeación y el manejo de los recursos hídricos de una región.
- c) Para los estudios de predicción de rendimientos agrícolas.
- d) Para la elaboración de los calendarios agrícolas.
- e) Para los estudios de predicción de inundaciones y sequías.
- f) Para los estudios sobre la erosión del suelo.
- g) Para la predicción de incendios forestales.
- h) Para las clasificaciones climáticas y agroclimáticas.
- i) Para los estudios sobre lixiviación o lavado de nutrientes químicos.

Como se puede ver, la técnica del cómputo del balance hídrico, altamente promocionada a raíz de los trabajos de C.W. Thornwaite entre mediados de las décadas del cuarenta y cincuenta, tiene aplicaciones de enorme trascendencia en áreas como la agronomía, la ingeniería, climatología, la edafolo-gía, etc.

Los cálculos de los balances hídricos se facilitan grandemente si se posee información de campo sobre las fluctuaciones de elementos como la humedad del suelo y la evapotranspiración, pero en vista de que las mediciones de tales parámetros presenta las dificultades descritas en el capítulo anterior, se han desarrollado (y popularizado) métodos diversos para su estimación a través de datos meteorológicos.

Dado que el cómputo del balance hídrico involucra el manejo racional de un gran volumen de datos meteorológicos, se deduce que es este un campo en el cual la agrometeorología presta invaluables servicios a la agricultura.

LA ECUACION GENERAL DEL BALANCE HIDRICO

El estudio de los aportes, el movimiento y las salidas de agua en una determinada zona constituyen la esencia del balance hídrico, todo lo cual se puede sintetizar en la siguiente ecuación general:

$$P = ET + \Delta HS + I + E$$

Donde: P = Precipitación (más riego si se suministra)

ET = Evapotranspiración

HS = Cambios de la humedad del suelo

I = Infiltración a las capas profundas

E = Escorrentía

Los balances hídricos se pueden computar para períodos diarios, semanales o mensuales, de acuerdo a las necesidades del caso.

Para fines operativos a corto o mediano plazo se suelen utilizar los balances diarios y semanales, mientras que para la planificación del manejo de los recursos hídricos a largo se requieren los balances mensuales.

A continuación se presentará un ejemplo sencillo sobre el cálculo de un balance hídrico diario para un período de quince días, con el objeto de dar a los estudiantes una primera aproximación al método. Como aún no se han discutido los conceptos de evapotranspiración potencial y actual, se utilizará en el ejemplo el término genérico "evapotranspiración" para considerar los procesos combinados de evaporación de todas las superficies y de transpiración de las plantas. Asimismo, se asumirá los suelos de la zona escogida para el ejemplo pueden almacenar hasta un máximo de 50 mm de agua. Igualmente se asume que el día anterior al día 1 el suelo estaba a capacidad de campo o sea con el contenido máximo hídrico.

Los datos de precipitación y evapotranspiración para el período escogido de quince días son:

<u>Día</u>	<u>P</u>	<u>ET (mm)</u>
1	0	6.5
2	0	6.8
3	0	5.0
4	0	5.7
5	0	6.0
6	0	7.0
7	0	5.8
8	0	6.2
9	0	6.0
10	0	5.0
11	12.2	5.5
12	3.8	4.0
13	0	4.8
14	50.5	6.0
15	25.0	5.0

Se asume que los datos de evapotranspiración han sido calculados mediante alguna fórmula de tipo empírico, con base en datos climáticos existentes. Con dicha información se prepara entonces el siguiente cuadro, en el cual se calcula el balance hídrico a nivel diario.

EJEMPLO DEL CÁLCULO DE UN BALANCE HÍDRICO DIARIO

CUADRO # 1

DIA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	TOTAL
P	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.2	3.0	0	53.5	25.0	99.5
ET	6.5	6.5	3.6	5.7	6.0	7.0	5.0	4.2	6.0	3.0	2.5	4.0	4.0	6.0	5.0	85.3
Alm	43.5	36.7	31.7	20.8	20.0	13.0	7.2	1.2	0	0	6.7	6.5	1.7	50.0	10.0	254.0
D	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10.0
E	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4.2	20.0	24.2

Sitio= A

Capacidad de almacenaje de agua en el suelo = 50mm

ET = Evapotranspiración

Alm = Almacenaje de agua

E = Excesos

D = Deficiencias

* Se refiere a la evapotranspiración potencial, concepto que será analizado con mayor detalle más adelante.

Ejercicio en clase: Calcular un balance hídrico diario, con los siguientes datos:

Capacidad de almacenaje de agua del suelo: 50mm.

Se empiezan los cálculos asumiendo que el suelo está a capacidad de campo.

<u>Día</u>	<u>Precipitación</u>	<u>Evapotranspiración (mm)</u>
1	6.2	6.2
2	0	7.0
3	0	7.8
4	2.5	8.0
5	0	8.7
6	3	6.0
7	0	7.5
8	0	8.0
9	0	7.8
10	0	7.5
11	10.5	7.0
12	0	8.3
13	30.8	5.0
14	34.0	3.8
15	12.5	5.3
16	78.5	3.0
17	0	5.5
18	0	7.0
19	0	7.5
20	0.3	8.5
21	0	8.0
22	0	8.3
23	0	8.8
24	3.3	6.8
25	7.8	6.5
26	25.0	3.5
27	32.5	3.0
28	31.0	3.0
29	7.5	6.3
30	0	7.0
31	25.0	7.5

+ se refiere a la evapotranspiración potencial, concepto que será discutido con amplitud más adelante.

3.- ANÁLISIS DE LOS ELEMENTOS DEL BALANCE HÍDRICO

Es importante conocer las particularidades de cada uno de los elementos componentes del balance hídrico, ya que de ello depende la mayor o menor precisión que tendrán los cálculos que se realicen. En efecto, si se asume para ciertos suelos una capacidad de almacenaje de agua errónea, si se deprecian para los cómputos cantidades bajas de precipitación por considerar que no tienen un efecto apreciable sobre el balance o si por el contrario se toman en cuenta algunos volúmenes pluviométricos excesivos que usualmente ocurren sin que alcance a infiltrarse y a ser utilizados por las plantas, se puede llegar a resultados alejados de la realidad.

Por todo lo anterior, es necesario analizar en detalle cada uno de los elementos o factores del balance hídrico.

3.1. La PRECIPITACIÓN

Es este el elemento responsable por los aportes hídricos en el balance general, sin contar el uso eventual de agua de riego, lo cual de hecho destaca su importancia.

Un aspecto relieve relacionado con este parámetro es el de densidad de la red pluviométrica que produce la información pluvial que luego se utiliza en los cómputos. Cuando el balance hídrico se calcula con fines de largo alcance, como la planeación del manejo de los recursos hídricos, los estudios de factibilidad de posibles obras de riego y drenaje o la clasificación agroclimática de una región, los datos pluviométricos provenientes de las estaciones componentes de la red meteorológica general son usualmente suficientes. Por el contrario, cuando los balances hídricos se calculan con fines de corto o mediano alcance, como el diseño y la operación de los programas de riego en una zona determinada, la densidad de las estaciones debe ser mucho mayor, de modo que se pueden determinar las variaciones locales de la precipitación. Algunos investigadores han estimado que para la operación exitosa de los planes de riego para cultivos como la caña de azúcar, se requiere la información proveniente de al menos un pluviómetro por cada 3 a 5 kilómetros cuadrados.

Otro hecho de importancia relacionado con la precipitación, es que en los cálculos de los balances hídricos se deben tener en cuenta todos los datos de lluvia ligeras o lloviznas, las cuales algunas veces no se consideran aduciendo que esos pequeños volúmenes no alcanzan a penetrar en el suelo y a ser utilizados por las plantas. No obstante, la trascendencia de las lluvias ligeras estriba en que la transpiración de las plantas se reduce mientras se evapora el agua que se ha depositado en la superficie de las hojas, lo cual representa una economía hídrica para los cultivos.

Se ha constatado que una precipitación de 2mm que haya sido interceptada casi en su totalidad por el follaje vegetal, puede demorar de dos a tres horas, en ser evaporada en días despejados, lapso en el cual la planta no eliminará por medio del proceso de transpiración una porción apreciable de sus reservas hídricas. Asimismo, se debe recordar que las plantas pueden utilizar en forma directa el agua que se deposite en las superficies foliares. También se debe anotar que como la precipitación es un elemento muy variable, se recomienda para numerosos casos el uso de determinados valores probabilísticos de dicho parámetro, en lugar de sus valores promedios. Estos últimos son a veces poco representativos, en especial cuando no existen series suficientemente largas, debido a la aleatoriedad relativa que caracteriza a las lluvias. De este modo, en muchos estudios relacionados con la planificación del riego, se utilizan en los cálculos de los balances hídricos las cantidades mensuales de lluvia correspondientes a los niveles probabilísticos del 75 o el 80% ($P_{0.75}$ ó $P_{0.8}$), o sea aquellos valores que se espera sean alcanzados en tres o cuatro años sobre un total de cuatro o cinco años respectivamente. Otro punto de interés es el que tiene que ver con la precipitación que realmente penetra en el suelo, en especial cuando se registran lluvias muy intensas. El agua que llega al suelo no puede pasar al interior del mismo cuando la intensidad de la precipitación sobrepasa la capacidad de infiltración.

Algunos investigadores consideran que alrededor de 50 mm de precipitación se infiltran completamente en un período de 5 días, mientras que para volúmenes mayores la capacidad de penetración disminuye de acuerdo a una ley parabólica y, según la cantidad total caída, el agua excedente fluye a través de la escorrentía. Otros técnicos suelen tomar como "lluvias efectiva" todas las precipitaciones inferiores a 50 mm, asumiendo que la mayoría de los suelos con capacidades medias de infiltración pueden absorber alrededor de 30 mm en una hora y que cerca de 20mm pueden ser retenidos en irregularidades del terreno. En este caso la "lluvia efectiva" se refiere a la proporción de la precipitación que es potencialmente capaz de penetrar al suelo, sin tener en cuenta su contenido de humedad.

Como se puede ver, hay divergencias en cuanto a las lluvias que realmente puede ser absorbida por el suelo, pero ello se debe a que dicho factor depende de la intensidad de la precipitación, del contenido de humedad del suelo y de las características del estudio y del área en cuestión.

3.2 EL CONTENIDO DE HUMEDAD DEL SUELO

Antes de efectuar los diversos cálculos involucrados en el balance hídrico, es importante determinar la cantidad de agua que puede ser almacenada por el suelo y la proporción que puede ser extraída por las raíces de las plantas.

Se considera en general que el agua disponible en el suelo es aquella retenida en la zona radicular y comprendida entre la capacidad del campo y el punto de marchitez permanente del suelo. La capacidad de campo de un suelo es la cantidad de agua que contiene un suelo completamente humedecido después de que ha ocurrido el drenaje de los excedentes hídricos, lo cual suele tardar de dos a tres días después de las lluvias o la aplicación de riego. La capacidad de campo depende de la textura y la estructura del suelo, el contenido de materia orgánica y la profundidad del suelo.

El punto de marchitez permanente es el límite superior de la cantidad de agua del suelo bajo el cual las plantas están permanentemente marchitas en una atmósfera con una humedad relativa del 100%. Dicho estado se suele alcanzar a tensiones de alrededor de 15 bares. El punto de marchitez permanente depende fundamentalmente de la textura del suelo. Se considera que cuando se alcanza el punto de marchitez permanente las plantas han extraído del suelo toda el agua que está a su alcance y en consecuencia en ese estado las plantas se marchitan y sobreviene un colapso fisiológico.

A raíz de los primeros trabajos de C.W. Thornwaite se difundió el uso generalizado de capacidades de campo de 100 mm para suelos "normales" o promedios" en los cálculos de balances hídricos, pero esta es una aproximación bastante grande, ya que algunos suelos profundos y de textura arcillosa pueden almacenar más de 300 mm de agua en tanto que en suelos superficiales y livianos dicha cantidad puede ser inferior a 50 mm.

De acuerdo a algunos investigadores los suelos arcillosos pueden almacenar cerca de 50mm de agua por cada capa de suelo de 30 cm, mientras que los suelos arenosos pueden albergar apenas 20 mm por cada capa de 30 cm o sea menos de la mitad que los primeros (7).

Considerando lo anterior, se deduce para fines agrícolas operativos es necesario determinar la capacidad de almacenaje de los suelos que se van a cultivar. Esto se suele efectuar en laboratorios de análisis de suelos en los cuales se encuentra la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente de diversas muestras de dos suelos en cuestión.

Cuando lo anterior no es factible, entonces se pueden utilizar algunas tablas especiales, en las cuales se presentan los almacenajes de agua aproximados para determinar profundidades, de acuerdo a la textura del suelo.

3.3. LA EVAPOTRANSPIRACION

Tal como se expresó en la sección 3.10 del capítulo tres de este curso, la evapotranspiración es un proceso combinado que comprende la evaporación de todos los tipos superficies (vegetal, superficie del suelo, láminas de agua, etc). y la transpiración de las plantas.

La evapotranspiración se utiliza en general como un indicador de las necesidades de agua de las plantas. Se examinarán a continuación dos conceptos de vital importancia en los estudios relacionados con el balance hídrico.

3.3.1 LA EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL

Una adecuada definición de la evapotranspiración potencial fue presentada por Penman, quién en uno de sus trabajos la definió como la cantidad de agua transpirada en una unidad de tiempo por un cultivo verde y de corta altura, el cual cubre completamente la superficie del suelo, de altura uniforme y sin limitaciones de agua en ningún momento.

En otra forma se puede definir la evapotranspiración potencial como la cantidad máximo de agua que puede perder un área cubierta completamente de vegetación, cuando el suministro de agua no presenta limitaciones. La evapotranspiración potencial depende del poder evaporante del aire, el cual a su vez está determinado por la radiación solar, la temperatura, el viento y la humedad del aire (1). En algunos estudios se ha podido constatar que la radiación es el factor preponderante en el proceso de la evapotranspiración y que sin contar el elemento temperatura el que ésta muy influenciado por la radiación, le siguen en importancia relativa el viento y la humedad del aire.

Existen diferentes métodos y fórmulas empíricas para calcular la evapotranspiración potencial, los cuales se estudiarán en la sección 4.4 de este capítulo.

Conviene destacar que la evapotranspiración potencial es inferior a la evaporación de una superficie libre de agua (como la medida en un tanque clase A). Penman y Schofield, citados por Chang (1), explicaron que ello se debe a los siguientes motivos:

- a.- La vegetación tiene un albedo mayor
- b.- Los estomas de las plantas se cierran durante las noches.
- c.- Los estomas presentan cierta resistencia a la difusión o paso del agua, la cual se incrementa en determinadas circunstancias.

De acuerdo con lo anterior, diversos técnicos han encontrado que la evapotranspiración potencial de un cultivo de corta altura es aproximadamente el 75% de la evaporación de una superficie libre de agua.

3.3.2. LA EVAPOTRANSPIRACION ACTUAL

También conocida como la evapotranspiración real, se le define como la cantidad de agua que se pierde por la evaporación desde la superficie del suelo y la transpiración de las plantas, bajo las condiciones actuales o reales de tiempo, suelo y vegetación.

La evapotranspiración actual y potencial son similares, consecuentemente. Sólo cuando el suelo está a capacidad de campo y los cultivos han llegado a una fase de desarrollo en que cubren completamente el suelo.

4.- CALCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL

Existen diversos métodos para calcular la evapotranspiración potencial además de la medición directa con los lisímetros vista en el capítulo anterior, la mayor parte de los cuales implican la solución de fórmulas matemáticas empíricas, desarrolladas en diferentes regiones y usualmente basadas en información climatológica.

En muchos textos de agrometeorología, climatología, agronomía, ingeniería, etc., es posible encontrar referencias detalladas sobre dichos métodos y por lo tanto en este Curso nos limitaremos a citar algunas de las fórmulas más conocidas y sólo dos de ellas serán objeto de estudio especial: las desarrolladas por Penman y Linacre.

Es necesario anotar que para estimar correctamente la evapotranspiración potencial se debería en lo posible utilizar un método que tome en consideración los diferentes elementos meteorológicos que inciden en el flujo de agua de una área cultivada hacia la atmósfera. Como se ~~vio~~ vio en el punto 4.3.3.1. dichos elementos son la radiación solar, el viento, la temperatura y la humedad del aire.

De acuerdo con lo anterior se deduce que las fórmulas que toman en consideración apenas uno o dos de aquellos elementos meteorológicos conducen a resultados inciertos, tal el caso de los métodos propuestos por Thornthwaite, Blaney Criddle, Turc, Papadakis, etc. Por el contrario, los métodos de Penman, Christiansen, Van Bavel y otros, al considerarse factores como la radiación neta, la transferencia advectiva de masa, la humedad del aire, etc., producen resultados más ajustados a la realidad.

Una forma adecuada de adelantar el estudio de la evapotranspiración potencial de una región dada, cuando no se posee información climática suficiente para desarrollar fórmulas complejas, es la de establecer una relación empírica entre los resultados obtenidos por un método simple (como el Thornthwaite) y uno integral (como el de Penman). Tal relación se establece para una o varias localidades con datos climáticos completos y luego el factor de relación determinado "factor de ajuste", se aplica a los restantes valores de evapotranspiración potencial calculados por el método simple para las demás localidades.

A continuación se presentan entonces algunos de los métodos mencionados, desde los más elementales hasta los que se pueden llamar "integrales", ya que integran factores físicos y empíricos.

4.1. EL METODO PROPUESTO POR C.W. THORNTHWAITTE

$$E_t = 1.6 (10) T/1)^a$$

E_t = Evapotranspiración potencial en centímetros para un mes de 30 días

T = Temperatura media del aire.

I = es un índice de calor equivalente a la suma de 12 índices mensuales (i), los cuales se hallan así:

$$i = (T/5)^{1.514}$$

$$a = 0.000006751^3 - 0.00007711^2 + 0.017921 + 0.49239$$

Los valores así encontrados se ajustan luego de acuerdo al número de horas de brillo solar de cada lugar y al número de días del mes.

El cálculo de la fórmula se facilita usando tablas o monogramas especiales que han sido preparados para tal fin y que se encuentran en numerosos libros. Este método de mucha popularidad por su sencillez, ya que sólo requiere información sobre temperatura del aire. No obstante, los resultados encontrados con este método frecuentemente son muy alejados de la realidad debido a que a temperaturas medias similares pueden corresponder condiciones muy distintas de radiación solar, humedad del aire y velocidad del viento.

4.2. EL METODO PROPUESTO POR BLANEY CRIDDLE

A partir de una primera fórmula desarrollada por Blaney y Morín en 1942 para determinar la evaporación desde una superficie de agua, posteriormente Blaney Criddle elaboraron un método para determinar la evapotranspiración de los cultivos.

$$U = Kf$$

Donde : U = Uso consuntivo mensual en pulgadas

K = Coeficiente del cultivo.

$$f = \frac{t.p}{100}$$

t = Temperatura media mensual en °F

p = Porcentaje mensual de horas diurnas con relación al total anual.

Los valores de p se encuentran en tablas preparadas para ese fin (véase referencia bibliográfica No. 1 del capítulo). Asimismo, el valor de K depende del tipo de cultivo y sus valores en general oscilan entre 0.6 y 1.

El comentario efectuado para la fórmula de Thornthwaite es válido también en este caso, con la salvedad de que la fórmula de Blaney-Criddle es más útil para fines agrícolas ya que indica el consuntivo o sea el requerimiento de agua de un cultivo dado.

4.3. EL METODO PROPUESTO POR MAKINK

$$E_t = 0.61 Q \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} - 0.12$$

E_t = Evapotranspiración potencial

Q = Radiación global incidente expresada en mm/día

Δ = Gradiente de la curva de tensión de saturación vs. temperatura, a la temperatura media del aire.

γ = Coeficiente psicrométrico (0.40 para AC y mm de mercurio)

Este método se basa en información de radiación solar. En algunos sitios se ha obtenido una buena correlación con respecto a los datos del lisímetro.

4.4. EL METODO PROPUESTO POR TURC

$$E_t = K \frac{T}{T + 15} (R_g + 50) \left(1 + \frac{50 \text{ HR}}{70}\right)$$

E_t = Evapotranspiración potencial en mm

T = Temperatura media mensual en °C

R_g = Radiación global en cal/cm²/día

HR = Humedad relativa en %, cuando es mayor al 50% el último término de la ecuación no se toma en cuenta.

K = Coeficiente cuyo valor es de 0.4 para meses de 30 y 31 días, 0.37 en el mes de febrero; 0.13 cuando se efectúan cálculos para períodos de 10 días.

Esta fórmula es más completa que las anteriores, ya que para su solución se precisan valores de temperatura y humedad del aire, así como de radiación solar. Algunos estudiosos mencionan que verificada bajo diferentes condiciones, el método estima E_t con un error inferior al 15% en dos de tres ocasiones para períodos de un mes y en tres de cuatro períodos mayores.

4.5. EL METODO PROPUESTO POR LINACRE

Recientemente E.T. Linacre ha propuesto una fórmula sencilla pero aparentemente satisfactoria para determinar la evapotranspiración potencial. Con base en sus trabajos previos sobre el cálculo de diversos términos de la ecuación de Penman a partir de datos de temperatura del aire, Linacre publicó en 1977 (referencia bibliográfica No. 6 del capítulo), un trabajo en el cual desarrolla una aproximación a la fórmula de Penman, pero usando solamente mediciones de temperatura y humedad del aire (esta última expresada en términos de punto de rocío.)

Dicha fórmula es:

$$E_t = \frac{\left[500 \times T_n / (100 A) \right] + 15(T - T_d)}{80 T}$$

Donde E_t = Evapotranspiración para vegetación con un buen suministro de agua y un albedo de 0.25, en mm/día

T = Temperatura media del aire en °C

T_m = $T = 0,006 h$ (o sea equivalente al nivel del mar)

h = Elevación en metros s.n.m.

TD = Punto de rocío promedio.

A = Latitud del lugar (expresados los minutos en décimas).

Cuando no se posee información sobre el punto de rocío, entonces el término $(T-T_d)$ se determina así:

$$(T-T_d) = 0.0023 h + 0.37T + 0.53R + 0.35R_{\text{año}} - 10.9$$

Donde R = Rango medio mensual de temperatura

$R_{\text{año}}$ = Diferencia entre las temperaturas medias del mes más cálido y el más frío.

Como se puede notar, esta fórmula se puede desarrollar con sólo datos de la temperatura del aire y de la temperatura del punto de rocío y aún en ausencia de esta última, sólo con datos de temperatura del aire.

Dado que la fórmula es en esencia una aproximación al método de Penman, los resultados con ella obtenidos serán más o menos cercanos a los logrados con el mencionado método de Penman.

De acuerdo a algunos trabajos realizados por el autor de la fórmula, y a resultados obtenidos por el autor de estos apuntes en diversos cálculos de evapotranspiración potencial para la República del Uruguay, el método de Linacre da resultados más satisfactorios que otros métodos simples, como el de Thornthwaite.

4.6. EL METODO DE PENMAN

La fórmula desarrollada por Penman para el cálculo de la evapotranspiración potencial ha sido ampliamente utilizada en lugares con condiciones climáticas distintas, con resultados generalmente buenos. Este método se basa en sólidos principios físicos, esencialmente en el balance de radiación sobre una superficie vegetal y en las condiciones aerodinámicas preva^lecientes. De allí los resultados positivos que se obtienen.

Para calcular esta fórmula se requiere información sobre los siguientes elementos meteorológicos: radiación solar (o en su defecto brillo solar), temperatura del aire, humedad del aire (humedad relativa o tensión de vapor) y velocidad del viento a 2 m sobre el suelo.

La fórmula general de la ecuación es:

$$E_t = \frac{\frac{\Delta}{r} Q_n + E_a}{\frac{\Delta}{r} + 1}$$

Donde: E_t = Evapotranspiración potencial en mm

Δ = Gradiente de la tensión de vapor saturante, con relación a la temperatura, expresando en mb/°C

r = Constante psicrométrica para el psicrómetro con ventilación forzada = 0.66

Q_n = Radiación neta expresada en unidades equivalentes de evaporación.

E_a = Término aerodinámico y a su vez:

$$Q_n = 0.75 Q_A \left(a + b \frac{m}{n} \right) \left[0T^4 (0.56 - 0.079 (\sqrt{a})) (0.10 + 0.90 \frac{m}{n}) \right]$$

Q_A = Radiación solar recibida en el límite exterior de la atmósfera, expresada en mm de agua evaporable.

a y b factores empíricos para reducir valores de brillo solar a radiación solar global.

n/N = relación entre el brillo solar actual y el teórico posible.

$$\sigma = \text{Constante de Stefan Boltzan} = 0.37 \times 10^{-10} \frac{\text{cal}}{\text{cm}^2 \text{min}^\circ \text{K}^4},$$

pero en este caso: $1.98 \times 10^9 \text{ mm de agua/día}^\circ \text{K}^4$

T = Temperatura media en °K

e_d = Tensión de vapor actual en milibares por su parte:

$$E_a = 0.26(e_s - e_d) (1 + 0.54 u)$$

e_s = Tensión de vapor saturante.

U = Velocidad media del viento en m/seg, a una altura de 2m sobre el suelo.

Algunos valores sugeridos de los factores empíricos a y b son (4):

	a	b
Para regiones templadas	0.18	0.55
Para regiones tropicales secas	0.25	0.45
Para regiones tropicales húmedas	0.29	0.42

Los valores $\frac{\Delta}{\gamma}$ se obtienen de talbas como las que se presentan al respecto en las referencias bibliográficas Nos, 3, 4, y 9.

Cuando la velocidad del viento no se ha medido a 2m sobre el suelo, es posible reducir la velocidad en una altura dada a la velocidad a 2m con la siguiente fórmula general de variación de la velocidad del viento con la altura:

$$U_h = U_{10} \left\{ 0.233 + 0.656 \log_{10} (h + 4.75) \right\}$$

Donde U_h = es la velocidad del viento a una altura h (en m)

U_{10} = Es la velocidad del viento a 10m.

5.- CALCULO DE BALANCES HIDRICOS GENERALES

Los aspectos básicos relacionados con el balance hídrico se discutieron en los apartes 2 y 3 de este capítulo: "La ecuación general del balance hídrico". Asimismo, se planteó en el punto 4 de cálculo de la evapotranspiración potencial por diferentes métodos. Se puede detallar ahora la elaboración de un balance hídrico general a nivel mensual.

Aún no se tocarán los aspectos relacionados con las necesidades de agua de cultivos específicos, lo cual será tratado en la siguiente sección de este capítulo.

A manera de ejemplo se determinará entonces el balance hídrico mensual para el año de 1979, para la zona representada por la estación meteorológica "Paso de los Toros".

Los datos disponibles son los siguientes:

- a) Capacidad de almacenaje del suelo: 50 mm (corresponden a un suelo superficial y de textura moderadamente gruesa).
- b) Contenido de agua en el suelo a principios de enero de 1979: 25mm.

c)

E	F	M	A	M	J	J	A	S	O
Lluvia (mm) 0.3	47.7	109.2	43.7	31.9	14.4	106.4	117.3	139.4	126.3
E_t (mm) 244.0	162.4	124.3	73.3	45.3	34.5	37.2	53.6	88.2	119.4

N

D

122.2	109.1
138.9	170.8

Los datos de evapotranspiración potencial (E_t) se calcularon utilizando la fórmula de Penman, a partir de los siguientes datos.

	T_x (°C)	HR	n/N	U_{2m} (m/seg)*
E	24.8	56	0.77	4.1
F	25.1	62	0.55	3.5
M	20.8	70	0.56	3.3
A	17.1	76	0.52	2.6
M	12.8	76	0.53	2.5
J	10.8	76	0.55	2.0
J	12.5	82	0.42	3.1
A	13.7	80	0.41	3.1
S	13.2	70	0.54	3.8
O	17.6	74	0.55	3.9
N	18.5	68	0.55	3.3
D	21.7	69	0.61	3.3

*La velocidad del viento se mide en la estación a una altura de 10 metros, por lo que fue necesario efectuar la reducción a 2 m, mediante la fórmula:

$$U_{2m} = U_{10m} \left\{ 0.233 + 0.656 \log_{10} (h + 4.75) \right\}$$

Donde $h = 2$ metros

U_{10m} = Velocidad del viento a 10m.

En consecuencia, el balance hídrico de 1979 para dicha localidad es el siguiente:

	E	F	N	A	H	J	J	A	S	O	N	D
LI	0.3	47.7	103.2	43.7	51.5	14.4	106.4	117.3	139.4	126.3	122.2	109.1
ETP	244.0	152.4	124.3	73.3	45.3	34.5	37.2	53.6	80.2	119.4	138.9	170.8
Alm	0	0	0	0	0	0	50.0	50.0	50.0	50.0	33.3	0
Def	218.7	114.7	15.1	29.6	13.4	20.1	0	0	0	0	0	28.4
Exc	0	0	0	0	0	0	19.2	13.7	51.2	6.9	0	0

Se nota que en el área estudiada se registraron deficiencias hídricas con siderables en los meses de enero y febrero y deficiencias moderadas en marzo, abril, mayo, junio y diciembre. Por otra parte, hubo excesos grandes en julio y agosto y excedentes medianos en septiembre y octubre. En el ejemplo anterior se debe hacer notar que la baja capacidad de almacenaje de agua del suelo puede ocasionar escurrimientos superficiales muy grandes en meses lluviosos y acentuar las deficiencias hídricas en meses secos.

6.- BALANCES HIDRICOS DE CULTIVOS

Hasta ahora se ha visto lo relacionado con el cómputo de balances hídricos generales. Se analizarán a continuación las necesidades de agua de los cultivos y los balances hídricos aplicados a cultivos.

6.1. Las Necesidades de Agua de los Cultivos

Se ha explicado anteriormente que la evapotranspiración potencial se puede utilizar como punto de referencia para conocer las necesidades de agua de los cultivos. Existen, sin embargo, diferencias apreciables entre la evapotranspiración potencial y la evapotranspiración de los cultivos, esta última es la que determina las necesidades hídricas de los cultivos. Las principales diferencias entre aquellas tienen que ver fundamentalmente con el tipo de cultivo y el estado de desarrollo del mismo.

Considerando que existe una evidente relación entre la evapotranspiración potencial (ET) y la evapotranspiración de los cultivos (ET_c) la cual puede expresarse como $ET_c = K_c$ para un cultivo determinado, se deduce que ET_c se puede estimar multiplicando ET por un coeficiente de cultivo (K_c), el cual fluctúa con el cultivo y su estado de desarrollo.

Dado que ET puede variar según el método que se use para su cálculo, lo cual a su vez afecta los valores de K_c , diversos agrometeorólogos han estimado estos últimos con base en la ET calculada según el método de Penman. De este modo K_c se puede expresar así (2):

$$K_c = \frac{ET_c}{ET \text{ Penman}}$$

$$ETR = ETP \times K_c$$

Especialistas en riego y drenaje de la FAO han desarrollado un método preciso para determinar los valores de K_c (véase la referencia bibliográfica NO. 3 del capítulo), el cual se puede resumir de la siguiente forma:

- a) Se asumen cuatro estados de desarrollo de los cultivos (para cada uno de los cuales se estima un valor de K_c), los cuales son:
 - a.1. Estado Inicial: comprende la germinación y el crecimiento inicial del cultivo hasta que llega a cubrir aproximadamente un 10% de la superficie del suelo.
 - a.2. Estado de desarrollo activo: desde el fin del estado previo hasta que el cultivo cubre cerca del 80% del suelo.
 - a.3. Estado ~~de~~ mediados del período agrícola desde el fin del estado anterior hasta la iniciación de la maduración.
 - a.4. Estado de finales del período agrícola: desde el inicio de la maduración hasta la maduración completa o la recolección.
- b) Se establece la fecha de siembra del cultivo.
- c) Se determina la longitud de la temporada agrícola y de cada período de desarrollo del cultivo.
- d) Se determina el coeficiente del cultivo (K_c) para el 1er. estado del cultivo (descrito en a.1), mediante las curvas que aparecen en la figura 4.1. Para seleccionar la curva a partir de la cual se extrapolará el valor de K_c para este primer estado, hay que estimar previamente la frecuencia de riego o de lluvias significativas durante el período.
- e) Se determina K_c el tercer estado del cultivo (descrito en a.3) utilizando el efecto de los valores presentados en el cuadro 4.1.
- f) Se establece el K_c para el cuarto estado del cultivo (descrito en 0.4) usando los valores del cuadro 4.1.
- g) Se hallan los valores de K_c para el 2do estado del cultivo uniendo en un gráfico especial los valores de K_c correspondientes a los estados 1 y 3.

Un gráfico construido con los valores de K_c de los distintos períodos de desarrollo permite determinar los valores de K_c para cualquier época del cultivo.

Véase al respecto el siguiente ejemplo:

Determinar los requerimientos hídricos del cultivo de la papa para la zona representada por la estación meteorológica de "SAN JOSE"

MÉTODOS AGROCLIMÁTICOS ESPECIALES

A.1.- Preámbulo

Se detallarán en este capítulo final algunos aspectos de gran importancia práctica, los que debido a sus características propias no se incluyeron en ningún temario previo. Son más bien aplicaciones de diversos conceptos discutidos a lo largo del Curso.

Las aplicaciones especiales de la agrometeorología son muy numerosas.- y dicho número aumenta con los días- y de ellas se han seleccionado tres que tienen un gran valor en el sector agrícola: los pronósticos agrometeorológicos de cosechas, la determinación de la fecha de recolección más temprana y la regionalización agroclimática.

Se espera que luego de discutir los aspectos anotados, los participantes en este Curso de Agrometeorología tendrán un panorama completo e integral de la Meteorología Agrícola y poseerán las bases suficientes para aplicar los conocimientos adquiridos en beneficios de un sector vital en el desarrollo de todo el país: El Agro.

A.2.- Los Pronósticos Agrometeorológicos de Cosechas.

Una estimación adecuada de la producción de los cultivos - si dicha estimación se efectúa con suficiente anticipación - permite tomar de antemano las medidas del caso para contrarrestar los efectos inciertos que generan las variaciones periódicas de los rendimientos agrícolas.

Los precios que pagan los consumidores por los diferentes productos agrícolas son grandemente afectados por el volumen disponible en los mercados locales. Una cosecha deficiente de un cultivo como el trigo, puede llevar los precios de dicho cereal y de sus subproductos a niveles críticos para los consumidores.- Por el contrario, una cosecha muy buena puede llegar a ocasionar a una oferta tan grande, que los precios bajen a niveles ruinosos para los productores. Todo lo anterior se puede prevenir si se dispone de buenos pronósticos de cosecha, ya que de esa forma las autoridades agrícolas pueden buscar con tiempo suficiente otros mercados para colocar los excedentes o gestionar importaciones para llenar los déficits.

Tal como se ha visto a través del curso, las oscilaciones temporales y espaciales de la precipitación, las temperaturas, la evapotranspiración, etc, juegan un papel preponderante en el desarrollo de los cultivos y afectan, en consecuencia, los rendimientos.- Por ello, es posible estimar tales rendimientos con base en el análisis continuo y detallado de las condiciones meteorológicas y de sus efectos sobre los cultivos. Este criterio es el fundamento de los modelos agrometeorológicos de pronósticos de cosecha.

Los modelos agrometeorológicos se pueden definir como una representación simplificada de las complejas relaciones existentes entre el tiempo atmosférico o el clima y el desarrollo del cultivo; esta representación se establece mediante el uso de técnicas matemáticas o estadísticas.

Los modelos existentes - del tipo cultivo vs. tiempo atmosférico- han sido clasificados por Baier (1) en los siguientes grupos:

- 1.- Modelos de simulación del crecimiento del cultivo que describe el impacto detallado de la variabilidad meteorológica en los procesos que ocurren dentro de una planta o una comunidad vegetal.
- 2.- Modelos de análisis agrometeorológico o dinámicos basados en estadísticas, los cuales establecen una relación continua de las reacciones del cultivo frente a determinadas variables agrometeorológicas.
- 3.- Modelos de rendimiento de regresión múltiple, que emplean una muestra de datos del rendimiento de una zona y una muestra de datos del medio ambiente y del suelo de la misma zona para obtener estimaciones de los coeficientes del modelo mediante algún tipo de técnica de regresión.

Los anteriores tres grupos no son excluyentes entre sí; en cualquier modelo se pueden presentar combinaciones de las características de los diversos grupos.

Ejemplos de los diversos modelos existentes se pueden encontrar en la literatura, en especial en la referencia bibliográfica # 5 del capítulo. Se describirá a continuación un modelo de pronóstico de cosechas que ha sido desarrollado por investigadores de la FAO (3), el que tiene características de sencillez, eficacia y versatilidad que lo hacen fácilmente aplicable a las condiciones biometeorológicas locales. Dicho modelo se podría incluir en el segundo de los grupos mencionados anteriormente.

El método se basa en un balance hídrico acumulado que se va calculando a lo largo del ciclo vegetativo de un cultivo dado, para períodos sucesivos de 10 días, o sea decádicos, pero tomando en cuenta que la última década de algunos meses puede tener 8, 9, 10, u 11 días, según el mes en cuestión. Los diversos cálculos conducen finalmente a la determinación de un índice, el cual explica, en términos porcentuales, la forma como se cubrieron los requerimientos hídricos del cultivo durante todo su proceso de crecimiento y desarrollo.

Los diferentes procesos de cómputo involucrados en el modelo se efectúan en un cuadro del tipo mostrado en la figura 8.1., en el que se pueden apreciar los factores que intervienen en el procesos y que son muy semejantes a los ya analizados en el capítulo de este Curso "El balance hídrico".

ESTACION _____ CULTIVO _____

			MESES Y DECADAS																		
	Enero			Febrero			Marzo			Abril			Mayo			Junio			Julio		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Pn																					
Pa																					
Da																					
ETp																					
Kc																					
NH																					
Pa-NH																					
Rs																					
E/D																					
I																					

Figura # 1.- Modelo de cuadro necesario para el cálculo del balance hídrico acumulado y el índice (I) utilizados para estimar los rendimientos agrícolas.

La explicación de cada uno de los factores que integran el cuadro es la siguiente:

- P_n = Precipitación normal. Se calcula con base en los datos climatológicos de períodos lo suficientemente representativos. Este parámetro no interviene luego en el cálculo del balance hídrico, sino más bien sirve como referencia para conocer el comportamiento de las lluvias de cada década con relación a la "lluvia normal" o promedia.
- P_a = Precipitación actual. Es la precipitación total caída en cada década.
- d_a = Días de lluvia. Representa el número de días con lluvia en la década y sirve para conocer mejor la distribución de este elemento en el período considerado.
- ETP = Es la evapotranspiración potencial. Los autores recomiendan utilizar el método de Penman para su cálculo.
- K_c = Coeficiente del cultivo. Es el mismo factor que se analizó en la sección 4.6.1. del capítulo del balance hídrico y aún cuando los autores mencionan algunos valores de referencia, estos coeficientes se pueden calcular en forma efectiva utilizando el método descrito en aquella sección del Curso.
- NH = Necesidades hídricas del cultivo. Es el producto de $(ET_p) \times (K_c)$.
- $P_a - NH$ = Diferencia entre la precipitación caída en cada década y los requerimientos hídricos del cultivo.
- R_s = Reservas hídricas del terreno. Al respecto véase la discusión efectuada en la sección 4.6.2 del capítulo IV.
- E/D = Excedentes o deficiencias hídricas. Indica los excesos o los déficits de agua que se registran en cada década, luego de efectuados los cálculos previos. Las deficiencias se acompañan del signo menos (-).
- I = Índice. Este índice es el punto culminante de todo el proceso anterior e indica el grado al cual la precipitación ha cubierto los requerimientos hídricos del cultivo durante cada década. Para calcular los valores que toma este índice se sigue el siguiente procedimiento:

-Se supone que la siembra tiene lugar cuando la disponibilidad de agua en el suelo es amplia y entonces se asigna a I un valor de 100 (unidades).

-El valor de I permanece en 100 durante las siguientes décadas hasta que en el renglón E/D aparezca un exceso superior a 100 mm o un déficit.

-Si durante una década ocurre un exceso que supere los 100 mm, entonces el valor de I se reduce en 3 unidades (bajará entonces a 97) y permanece así hasta que se presente un nuevo período crítico.

-Cuando el agua disponible para el cultivo desciende hasta 0 y empieza a registrarse deficiencias, se calcula entonces el cociente entre el valor de la deficiencia y el requerimiento hídrico total del cultivo. Si, por ejemplo, la deficiencia de agua en una década es de 20mm y el requerimiento de agua total del cultivo es de 400 mm, el cociente será $\frac{20}{400} = 0.05$, o sea equivalente a un déficit del 5% con relación a las necesidades totales de agua del cultivo. En dicho caso se restan 5 unidades del valor de I que venía de la década anterior. Dicho procedimiento se repite cada vez que surja un nuevo déficit.

Como consecuencia de todo lo anterior, el valor final del índice reflejará el esfuerzo acumulado que ha tenido que soportar la planta durante su ciclo de vida, debido a los excesos o las deficiencias de agua en diversos períodos. Asimismo, dicho índice será un factor correlativo de las posibles mermas en la producción ocasionadas por el esfuerzo acumulado antes mencionado. Lo anterior significa que existe una estrecha correlación entre el índice y el rendimiento final del cultivo, a menos que otros factores como la ocurrencia de heladas, vientos muy fuertes plagas o enfermedades de consideración, etc, tengan un efecto de importancia sobre la cosecha, caso en el cual es necesario darle el paso necesario a dichos aspectos antes de emitir un juicio al respecto.

Es necesario entonces-se deduce de lo expuesto en el párrafo anterior--establecer la correlación existente entre los valores de I y los rendimientos obtenidos durante varios años (esto se puede realizar en forma retrospectiva, o sea con datos de años anteriores), para cada cultivo de interés.

Tal correlación posibilita posteriormente la estimación de los rendimientos a partir de los valores de I que se vayan calculando durante la temporada agrícola.

Cabe anotar que los valores de I tienden a estabilizarse hacia el final de la temporada del cultivo o sea en la fase de maduración, cuando en general los requerimientos hídricos no son elevados. Ello indica que el valor I que se determina dos o tres décadas antes de la cosecha, constituye un sólido indicativo de su valor final.

A continuación se presentará un ejemplo, en el cual se determina el valor de I para el cultivo del trigo, correspondiente a la temporada agrícola del segundo semestre de 1979 y a la localidad de "Mercedes". En este ejemplo no se incluyen los valores de P_n y d_a , los cuales no intervienen directamente en los cálculos del caso y más bien constituye información suplementaria de referencia.

A.3 Determinación de la fecha más temprana de Recolección:

Entre los diversos métodos existentes para determinar la fecha más temprana de recolección de un cultivo dado, se destaca el método de los grados diarios de crecimiento (GDD).

En dicho método se presupone que la fecha más temprana en la cual un cultivo ya podría ser cosechado es el día en que el número acumulado de grados diarios de crecimiento alcanza cierto valor ya establecido. Los principios más importantes relacionados con el método son los siguientes:

- Existe una temperatura "base" o "efectiva", bajo la cual no hay crecimiento activo de los cultivos.
- Un cultivo alcanza determinado estado de desarrollo cuando ha recibido cierta cantidad de calor, sin tomar en cuenta el tiempo transcurrido.
- El crecimiento es proporcional al número de grados diarios acumulados sobre la temperatura base durante la época de crecimiento. Dicho número se conoce como los grados diarios de crecimiento (GDD).
- Los GDD para un día particular se calculan restando la temperatura base del cultivo (usualmente 5 o 10 °C), de la temperatura media diaria. De este modo:

$$\text{GDD (para un día X)} = T_{\text{día}} - T_{\text{base}}$$

A.4 Regionalización Agroclimática

Con los estudios de regionalización agroclimática se busca delimitar las regiones que tienen similares condiciones de clima y suelo. Este tipo de estudios constituyen una herramienta indispensable en los siguientes campos: La planificación agropecuaria a mediano y largo plazo:

- La asignación de prioridades en los planes de desarrollo regional agropecuario;
- El trazado de nuevas políticas agrícolas.
- La determinación de los cultivos más apropiados para diferentes regiones;
- La complementación de la red de estaciones agrometeorológicas;
- La elaboración de calendarios agrícolas regionales;
- La determinación de balances hídricos y necesidades de agua de los cultivos en regiones definidas;

-La adecuada sectorización de la información suministrada en los boletines agrometeorológicos.

Existen diferentes procedimientos para realizar una regionalización agroclimática, pero a continuación se enunciarán los lineamientos generales que el autor de estos apuntes ha seguido para estudios de este tipo en Colombia y últimamente en Uruguay, en asociación con J.P. Chiara:

1.- Análisis climático. Comprende el análisis temporal y territorial de los siguientes elementos:

1.1. Temperatura del aire.

1.2. Humedad relativa.

1.3. Brillo solar

1.4. Viento.

1.5. Evaporación.

1.6. Precipitación.

2.- Estimaciones de la evapotranspiración potencial a nivel mensual, estacional y anual. Los cálculos de este parámetro deberían realizarse de acuerdo a la fórmula de Penman, por las razones ampliamente discutidas en el capítulo del balance hídrico sin embargo, debido a que frecuentemente no se poseen los datos climáticos necesarios para desarrollar aquella fórmula, se establece una relación empírica entre los resultados obtenidos para algunos lugares por un método simple (como el de Linacre) y por el de Penman. Luego el factor de relación hallado (o "factor de ajuste"), se aplica a los valores de ETP calculados por el método simple para un gran número de localidades.

3.- Determinación de los índices de disponibilidad hídrica (1).

Estos índices también se calculan a nivel mensual, estacional y anual e indican la relación existente entre la precipitación y la evapotranspiración potencial.

Por ello,

$$I = \frac{RR}{ET_p}$$

Donde:

RR = Precipitación

ET_p = Evapotranspiración Potencial

El índice así calculado es un integrador de los elementos climáticos y señala la disponibilidad promedio de agua para los cultivos.

- 4.- Determinación de los períodos libres de heladas para todas las estaciones que poseen series extensas de temperaturas mínimas.
- 5.- Determinación de las regiones con condiciones similares de textura y capacidad de almacenaje de agua del suelo.
- 6.- Superposición de los mapas descritos en el punto 6, como consecuencia de ello, delimitación de las regiones agroclimáticas existentes.

En las referencias bibliográficas # 2 y 6 de este capítulo, se pueden encontrar otros procedimientos existentes para la zonificación de cultivos específicos, como el té y el trigo.