

**SECRETARIA DE RECURSOS NATURALES
DIRECCION GENERAL DE RECURSOS HIDRICOS
DEPARTAMENTO DE SERVICIOS HIDROLOGICOS Y CLIMATOLOGICOS
SECCION DE AGROMETEOROLOGIA**



CURSO DE AGROMETEOROLOGIA

Tegucigalpa, D.C.

Honduras, C.A.

CURSO DE AGROMETEOROLOGIA

INTRODUCCION

LA METEOROLOGIA AGRICOLA SU IMPORTANCIA Y APLICACIONES



La Agrometeorología se ocupa del estudio de la relación existente entre los factores meteorológicos y la vida de plantas y animales, con miras a aumentar la producción y/o reducir los daños al agro que están asociados con el tiempo atmosférico.

El desarrollo de la Agrometeorología en los últimos años es realmente impresionante y ello se debe a diferentes factores. Por una parte, la crisis mundial de alimentos ha generado la búsqueda de nuevas técnicas que incrementen la producción agropecuaria, con lo cual se destinan mayores recursos económicos a las actividades relacionadas con la agricultura. Por otra parte, los Servicios Meteorológicos, que a raíz de la II Guerra Mundial enfocaron sus labores hacia la parte aeronáutica, disponen ahora en general de mayores recursos humanos y técnicos para destinarlos a un área que ha demostrado tener gran peso en la economía agrícola de los países: La Meteorología Agrícola.

Es difícil calcular la contribución económica de la Agrometeorología a las finanzas de una nación, ya que se debe tener en cuenta, por ejemplo, las pérdidas evitadas por una advertencia meteorológica oportuna, pero en general se ha estimado que dicha contribución no es inferior al 1% de la producción agropecuaria total. Esto es equivalente a algunos cientos de miles de dólares, e inclusive millones, en los diversos países.

De este modo, el estudio del clima de una región agrícola dada, ha llegado a ser tan importante como el estudio de sus suelos, sus recursos hidrológicos, sus bosques, etc.

Las aplicaciones de la Agrometeorología en el sector agropecuario son múltiples y, en términos generales, se pueden resumir en la forma que a continuación se detalla.

1.- En la selección de las regiones óptimas para el desarrollo de un cultivo en particular.

Los cultivos se desarrollan en forma eficiente, solo en aquellos lugares en que las condiciones naturales les son favorables. Tratar de implantar un cultivo en una región donde los regímenes de lluvia, temperatura, humedad, etc, no son adecuados, le ocasionará al aventurero empresario grandes pérdidas. Los ejemplos al respecto abundan, en escala tanto grande como pequeña. Un Proyecto para introducir maní en un país Africano -Tanzania- fracasó porque luego de estériles esfuerzos se comprobó que el régimen de lluvias no era el requerido para la variedad en cuestión. En este caso se reportaron pérdidas cercanas a los U\$\$ 50 millones.

Se observa con alguna frecuencia que los agricultores pasan de un cultivo a otro, movidos por razones algo subjetivas, pero sin tomar en consideración lo antes anotado. Por supuesto, los resultados en muchos casos son negativos.

Existen diversos métodos para la selección de los sitios más apropiados para los cultivos y entre ellos se pueden mencionar las analogías agroclimáticas, las valoraciones ponderadas y las clasificaciones climáticas y agroclimáticas. Todos estos métodos serán analizados convenientemente a lo largo de este Curso.

Siguiendo dicho tipo de métodos, Huttonson encontró las regiones óptimas para producir cítricos en Israel, Burgos y Corsi determinaron tres regiones agroclimáticas para el trigo en Uruguay y Boshell ubicó zonas propicias para el tomate, el té y la piña en Colombia.

2.- En la selección de los cultivos más apropiados para una región

Este caso es semejante al anterior, pero mientras en aquel el problema dado era la escogencia de los mejores sitios para cierto cultivo, en este se trata de la selección de los cultivos adecuados para cierta región.

Para llevar a cabo esta selección, se suele efectuar una regionalización agroclimática previa, y luego se comparan los requerimientos climáticos de una amplia gama de cultivos con las condiciones prevalecientes en la región en cuestión. De esta comparación surgen los cultivos que mejor se adaptarían a aquellas.

Asimismo este tipo de análisis permite determinar los calendarios agrícolas en forma conveniente, ya que del estudio de los regímenes de lluvia, temperaturas, humedad relativa, etc, se seleccionan las fechas más adecuadas para sembrar o transplantar los cultivos, realizar las faenas culturales, estimar la época de la cosecha, etc.

3.- En la selección o mejoramiento del sitio para ciertos cultivos, en un campo agrícola

Los campos agrícolas de cierta extensión comprenden frecuentemente, lugares con distintas condiciones de suelo, relieve, exposición etc., y, por supuesto, aquellas diferencias originan condiciones microclimáticas especiales. Por ello, es importante evitar en un campo aquellos sitios más susceptibles a la ocurrencia de heladas se veras, como son los lugares bajos y cerrados, donde el aire frío tiende a depositarse. Asimismo, la siembra para semilla de cultivos como la papa, se debería ejecutar en sitios con buena ventilación, para evitar la creación de condiciones muy húmedas, que asupician los ataques de enfermedades.

Por otra parte, en ciertos casos es posible, con base en estudios locales de viento, proteger en forma más adecuada los cultivos y el ganado mediante barreras rompevientos.

4.- En la lucha contra las plagas y enfermedades vegetales

Los insectos y los hongos que atacan y destruyen con relativa frecuencia a los cultivos, se presentan cuando las condiciones ambientales favorecen su proliferación.

Hay pocos aspectos de las enfermedades de las plantas, desde la cantidad de inóculo que permanece en un área, hasta la persistencia de los residuos químicos utilizados para combatirlas, en los cuales no tengan importancia los factores meteorológicos.

La relación tiempo atmosférico - ciclo de vida del patógeno ha sido la base para el desarrollo de modelos y sistemas de predicción de diferentes enfermedades. Es así como se han iniciado en diferentes países sistemas de advertencias contra ataques del tizón temprano y el tizón tardío de la papa, de diferentes royas del trigo, del peronóspora de la vid y la cebolla, de la sarna de peras y manzanos, etc.

Los diferentes sistemas toman en consideración los datos meteorológicos (humedad relativa, temperatura, viento etc). de distintos sitios, los cuales se confrontan con los valores meteorológicos que se sabe favorecen a los hongos y de allí se desprende una eventual advertencia.

Las predicciones agrometeorológicas así emitidas, reducen el número de tratamientos con productos químicos a unos pocos bien programados, con los cual se bajan grandemente los costos y se reducen los riesgos de daños fitotóxicos y mecánicos.

5.- En la Lucha contra las Heladas

Las heladas constituyen uno de los principales problemas para el sector agropecuario, ya que ocasionan daños en la calidad y la cantidad de los productos agrícolas y mermas considerables en la producción de leche, carne, etc.

Este es un aspecto en el cual la Agrometeorología puede suministrar a los agricultores advertencias oportunas sobre la ocurrencia del fenómeno y re-comendaciones sobre las formas de reducir los daños provocados por aquel. La predicción de la helada es, en esencia, una predicción de la temperatura mínima que se presentará en las primeras horas del día siguiente, pero a la cual se agrega el análisis sobre el tipo y estado de desarrollo de los posibles cultivos que serán afectados.

La selección de un determinado método de prevención o control de los daños a los cultivos, depende en gran medida de la naturaleza del fenómeno (helada de radiación, advección, mixtas), de su frecuencia e intensidad, del tipo de cultivo que se busca defender y, por supuesto, de los medios o re cursos disponibles.

6.- En la irrigación y drenaje de los campos agrícolas

Para obtener altos rendimientos en las cosechas es de especial importancia suministrar agua a los cultivos de acuerdo a sus requerimientos, así como sacar de los campos los excedentes hídricos (por lluvias excesivas), que pueden anegar los terrenos y perjudicar las plantas.

Tanto en los cálculos preliminares de los volúmenes totales de agua que se precisan para irrigar una superficie dada (volúmenes que deberán ser aportados por ríos o embalses), como en las posteriores estimaciones de las cantidades que se deben suministrar regularmente a los cultivos, los datos climáticos son indispensables. En efecto, los datos de lluvia y evapotranspiración potencial (factor este que se calcula a partir de temperatura, humedad relativa, radiación solar y viento), son necesarios para computar los balances hídricos zonales y con ello los déficits ó excesos que serían controlados mediante el riego o el drenaje.

lluvia y evapotranspiración potencial (factor este que se calcula a partir de temperatura, humedad relativa, radiación solar y viento), son necesarios para computar los balances hídricos zonales y con ello los déficits ó excesos que serían controlados mediante el riego o el drenaje.

7.- En la predicción de los rendimientos agrícolas.

8.- En la selección de las prácticas agrícolas que permitan un aumento en la producción a través de una mayor absorción de A_s .

CURSO DE AGROMETEOROLOGIA

CAPITULO I

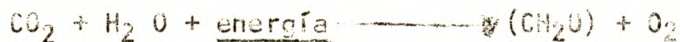
BALANCE DE RADIACION



1.1.- IMPORTANCIA

La radiación proveniente del sol constituye la fuente primaria de energía para prácticamente todos los procesos físicos y biológicos que ocurren en nuestro planeta. La energía de otras fuentes, como las estrellas y el interior de la tierra, es muy reducida.

Monteith, citado por Chang (1), enfatiza la importancia de la radiación del sol en el agro, cuando afirma, "La agricultura es una explotación de la energía solar, hecha posible a través de un adecuado suministro de agua y nutrientes para mantener el crecimiento de las plantas". Este hecho se comprueba en la fotosíntesis, proceso fundamental en la producción de la materia orgánica de los vegetales, cuya ecuación básica muestra el trascendental papel de la energía de la radiación solar:



donde CH_2O corresponde en general a la materia seca producida.

Por otra parte, la radiación solar proporciona la energía necesaria para las diversas corrientes atmosféricas y oceánicas, ocasiona la evaporación del agua de los océanos y los ríos, es almacenada en diferentes formas y, por consiguiente, sus fluctuaciones repercuten en las variaciones del estado del tiempo en cualquier lugar de la tierra.

Tan solo una parte de la radiación solar total que llega al límite superior de nuestra atmósfera, logra alcanzar la superficie del planeta. A su vez, una parte de esta radiación es reflejada por dicha superficie o por la cobertura vegetal y por consiguiente no se utiliza en los procesos biológicos.

La energía disponible finalmente para las plantas depende, en consecuencia, de diversos factores que afectan la radiación solar, tanto en su travesía por la atmósfera, como al nivel del suelo.

Por todo lo anotado, se deduce que el estudio del balance de la radiación en la capa cercana al suelo- donde crecen los cultivos- es fundamental para el entendimiento de las relaciones existentes entre la meteorología y la agricultura.

1.2.- La Distribución Espectral de la Radiación solar

Antes de analizar el espectro solar, conviene recordar que la energía radiante atraviesa el espacio en forma de ondas. La distancia que separa dos crestas sucesivas de una onda se llama longitud de onda. El ojo humano es sensible tan solo a determinadas longitudes de onda, llamadas ondas luminosas.

La energía radiante que se propaga por el espacio en forma de ondas luminosas, se denomina radiación visible. Sin embargo, la energía radiada por el sol se propaga en ondas de longitudes muy diferentes (4).

La unidad utilizada con mayor frecuencia para medir las longitudes de onda de las ondas electromagnéticas (como las de la radiación solar), es el micrón, que equivale a la millonésima parte de un metro y se representa por el símbolo μ .

Aproximadamente el 99% de la radiación electromagnética emitida por el sol, corresponde a longitudes de onda entre 0.15 y 4.0 micrones (4) (5).

Debido a ello, la radiación solar se conoce comunmente como radiación de onda corta.

Alrededor de un 9% de la radiación solar total está comprendida en la porción ultravioleta del espectro, correspondiente a longitudes de onda menores a 0.4 micrones, el 45% en la parte visible del espectro, situada entre longitudes de onda de 0.4 a 0.7 micrones, mientras que un 46% de dicha radiación, se emite en el infrarrojo, que corresponde longitudes de onda superiores a 0.7 micrones.

En la figura 1.1 se puede apreciar la distribución general del espectro solar.

Es conveniente mencionar el efecto que tiene la radiación de diferentes bandas del espectro solar, sobre el crecimiento de las plantas. A este respecto, se consignan las apreciaciones del Comité Holandés de Irradiación en Plantas, citadas por Chang (1):

- 1a.- banda: Radiación con longitudes de onda mayores a 1.0 micrón. No se conocen los efectos específicos de esta radiación en las plantas. Esta radiación, tal como es absorbida por la planta, se transforma en calor sin interferir con los procesos bioquímicos.
- 2a.- banda: Radiación entre 0.72 y 1.0 micrón. Esta región en forma específica afecta la elongación de las plantas. Así mismo, es importante para el fotoperiodismo, la germinación de las semillas, el control de la floración y la coloración de los frutos.
- 3a.- banda: Radiación entre 0.61 y 0.72 micrones. Esta región espectral es absorbida intensamente por la clorofila y genera alta actividad fotosintética.

- 4a.- banda: Radiación entre 0.51 y 0.61 micrones. Es una región de baja actividad fotosintética en el verde y de baja actividad formativa.
- 5a.- banda: Radiación entre 0.40 y 0.51 micrones. Esta es esencialmente la región de absorción más intensa de la clorofila y los pigmentos amarillos.
Asimismo, es una región de alta actividad fotosintética en el azul violeta y de fuertes efectos formativos.
- 6a.- banda: Radiación entre 0.31 y 0.40 micrones. Produce efectos en la formación, los cuales se reflejan en plantas mas cortas y de hojas más pequeñas.
- 7a.- banda: Radiación entre 0.28 y 0.31 μ . La radiación de esta zona es perjudicial para la mayoría de las plantas.
- 8a.- banda: Radiación con longitudes de onda menores a 0.28 μ . Estas longitudes de onda matan rápidamente las plantas.

1.3.- La Constante Solar

Se ha comprobado que la cantidad de radiación solar que llega al límite exterior de la atmósfera terrestre, no cambia significativamente. Por ello, se ha determinado una cantidad conocida como la constante solar. Esta se define como la cantidad de radiación solar incidente, por unidad de área y de tiempo, que se recibe en una superficie perpendicular a la radiación y localizada en el límite exterior de la atmósfera, cuando la tierra está situada a su distancia media del sol. (5).

El valor que se ha determinado para la constante solar es de 1.360 julios $\text{seg}^{-1} \text{m}^{-2}$, el cual es equivalente a 2.0 langleys por minuto. Un langley es una unidad de energía equivalente a un gramo-caloría por centímetro cuadrado.

No se han detectado variaciones significativas de la constante solar y alguna evidencia reciente indica que el límite superior de cualquier variación está dentro del rango de los errores instrumentales. La fluctuación de tales variaciones es inferior al 2% con respecto al valor indicado, y se atribuye a cambios cíclicos en los extremos más apartados del espectro solar.

1.4.- Leyes de interés en el estudio de la Radiación

Para lograr un entendimiento adecuado de los efectos de la radiación solar, terrestre y atmosférica (estas dos últimas se analizarán en la sección 1.7), sobre los diversos procesos físicos y biológicos, es necesario conocer algunas leyes importantes en que se fundamentan los fenómenos radiativos. Dichas leyes serán presentadas a continuación; una discusión más amplia acerca de ellas, se puede encontrar en las referencias bibliográficas números 2, 3 y 5 citadas al final de este capítulo.

1.4.1. Ley de Stefan - Boltzmann.

Expresa que la intensidad de la radiación total emitida por un cuerpo negro, es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta.

$$I = \epsilon \sigma T^4$$

donde σ es la llamada "constante de Stefan" y es igual a 0.817×10^{-10} cal cm⁻² min⁻¹ deg⁻⁴.

Un cuerpo negro se define como un hipotético "cuerpo" que absorbe toda la radiación electromagnética que recibe; ello implica que no refleja ni transmite la radiación incidente.

Asimismo, dicho "cuerpo" emite el máximo posible de radiación a cierta temperatura, en cada una de las longitudes de onda. Se le considera un perfecto "receptor" y "emisor".

1.4.2. Ley de Wien

A una temperatura dada, T , la longitud de onda, λ , de máxima emisión de un cuerpo negro es igual a :

$$\lambda_{\max} = \frac{a}{T}$$

donde $a = 0.2898 \text{ em } ^\circ\text{K}^{-1}$

De este modo, a mayor temperatura de un cuerpo negro, menor será la longitud de onda de máxima intensidad.

1.4.3. Ley de Planck

La distribución de la energía en el espectro de un cuerpo negro, es función solamente de la temperatura (T) y la longitud de onda (λ) y está dada por:

$$E_{\lambda} d\lambda = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1}$$

donde $c_1 = 3.742 \times 10^{-16} \text{ J m}^2 \text{ s}^{-1}$

$c_2 = 1.439 \times 10^{-2} \text{ m } ^\circ\text{K}$

1.4.4. Ley de Kirchhoff

El cociente entre el poder de emisión (e_{λ}) y absorción (a_{λ}), es igual para todos los cuerpos, a iguales temperaturas y longitudes de onda. Ello implica que dicho cociente no depende de la naturaleza del cuerpo, sino de su temperatura y longitudes de onda radiada.

$$\frac{e_{\lambda}}{a_{\lambda}} = E_s (\lambda, T)$$

1.5.- Reducción de la Radiación Solar Incidente

Solamente una parte de la radiación solar total que se recibe en el límite exterior de la atmósfera terrestre, alcanza finalmente la superficie del planeta, ya que en su paso por la atmósfera, diferentes cantidades de radiación son difundidas, absorbidas o reflejadas por el polvo en suspensión en el aire, los gases atmosféricos o las nubes. Además, la radiación solar recibida en una superficie horizontal, depende de la longitud de la trayectoria de los rayos solares en el seno de la atmósfera, lo cual es función de la latitud del lugar, de la época del año y de la hora del día. Se analizarán a continuación los procesos que ocasionan la reducción de la radiación solar incidente.

El ozono, el vapor de agua y el CO₂ absorben una porción de la radiación solar que atraviesa la atmósfera; la energía así absorbida no queda disponible luego para los procesos que ocurran en la capa cercana al suelo ya que es utilizada para incrementar la temperatura de aquellos gases en la alta atmósfera.

Una de las características más destacadas del espectro solar, es la casi abrupta terminación de las longitudes de onda corta hacia los 0.29 μ . Esto se debe fundamentalmente al ozono y, en menor proporción, al oxígeno y a otros gases presentes en la parte alta de la atmósfera, los cuales absorben la mayor parte de la radiación ultravioleta. No obstante, el porcentaje de radiación incidente así absorbida, es relativamente pequeño y es del orden del 2%.

Por otra parte, el vapor de agua, y en menor proporción el CO_2 , absorben cantidades moderadas de radiación, correspondientes a la región del infrarrojo cercano. Los aerosoles, tales como el polvo, el humo y las partículas salinas, también absorben alguna radiación, aún cuando en menores proporciones. (5).

1.5.2. Difusión

Otro proceso que reduce la intensidad de la radiación solar, es la difusión; sin embargo, esta no ocasiona una transferencia de energía radiante en calor, como en la absorción, sino que constituye un cambio en la dirección de propagación, cuando la radiación hace contacto con las partículas difusoras.

Los gases y las partículas presentes en la atmósfera, diseminan la radiación en todas direcciones y mientras que una parte es devuelta al espacio otra llega a la superficie.

La cantidad y dirección de la difusión depende del tamaño de las partículas difusoras, en relación con la longitud de onda de la radiación incidente. Las partículas pequeñas ocasionan una difusión molecular; la luz azul, por ejemplo, se difunde más que la roja y ello causa el color azul del cielo. Por el contrario, las partículas cuyo diámetro es superior a la longitud de onda de la luz, dan lugar a la reflexión difusa; las nubes y la niebla, por ejemplo, por su tamaño relativamente grande, no modifican el color de la luz y de allí su aspecto claro. (4) (5).

1.5.3. Reflexión

Una parte considerable de la energía solar incidente, es reflejada por la superficie de las nubes y es devuelta al espacio.

Asimismo, una gran porción de la radiación que finalmente alcanza la superficie, es reflejada por el suelo, la cobertura vegetal, la superficie líquida, etc.

Un concepto importante en Agrometeorología, está relacionado precisamente con la reflexión de la radiación en superficie, y lo constituye el albedo. Este se define como la relación entre la cantidad de radiación global reflejada por la superficie y la cantidad de radiación incidente. El albedo medio del planeta tierra es de 0.35.

El albedo de una superficie vegetal depende de su color, las condiciones de humedad, la densidad de la cobertura vegetal, la distribución de las hojas y el ángulo del sol (1).

La reflexión generalmente: a) aumenta con el brillo visual de la superficie; b) disminuye cuando se humedecen las superficies vegetales o el suelo, a causa del efecto de "oscurecimiento" de que viene acompañado; c) disminuye cuando la cobertura vegetal está aún incompleta (cultivos en germinación o primeras fases de crecimiento), en razón al menor albedo del suelo desnudo.

Algunos albedos encontrados para diferentes tipos de superficies son: para la nieve 0.8 cuando es reciente y 0.5 cuando es sucia y de cierto tiempo; para las pasturas 0.25; caña de azúcar 0.05 a 0.18; piña 0.05 a 0.08; bosques 0.05 a 0.18; superficie del mar 0.08 a 0.10; campos agrícolas y tierras de labor 0.15 a 0.3; suelos arenosos secos 0.3; suelos arenosos humedecidos 0.2 (1) (2) (5).

Se ha estimado que finalmente, en promedio, tan solo el 43% de la radiación solar es realmente absorbida por la superficie terrestre. Esta cantidad corresponde a condiciones de cielo medianamente cubierto, ya que cuando el cielo está despejado, alrededor del 60% de la radiación puede ser absorbida por el suelo, mientras que bajo cielo cubierto aquella cantidad oscila alrededor del 28%.

La gráfica 1.2; adaptada de la referencia bibliográfica 4 de este capítulo, ilustra la forma como se distribuye, en términos medios, la radiación solar incidente, suponiendo que al límite exterior de la atmósfera llegasen 100 unidades de aquella.

1.6.- Radiación Solar Global, Difusa y Directa

Son estos tres términos corrientemente utilizados en Agrometeorología y por ello conviene diferenciarlos en forma adecuada.

La radiación difusa es aquella que alcanza indirectamente la superficie terrestre, luego de ocurrida la difusión atmosférica analizada en el punto anterior.

La radiación solar directa es aquella proveniente del ángulo sólido del disco solar y que se recibe en una superficie perpendicular al eje del ángulo sólido.

La radiación solar global es la suma de la radiación solar difusa y de la radiación directa. Esta es la radiación que con mayor frecuencia se toma en consideración en los diferentes estudios agrometeorológicos.

1.7.- Radiación Terrestre

Se ha analizado hasta ahora la radiación solar o de onda corta. En esta sección se tratará la radiación terrestre o de onda larga.

De acuerdo a la ley de Stefan - Boltzmann, enunciada en el punto 1.4.1. la intensidad de la radiación emitida por un cuerpo es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura y según la ley de Wien, la longitud de onda de máxima emisión es inversamente proporcional a su temperatura.

Por ello el sol, que tiene una temperatura aproximada de 6.000°C en la fotosfera, emite radiación de onda corta, principalmente en la banda de 0.15 a 4.0μ y emite su máximo de energía hacia los 0.5μ , en la parte visible del espectro. Por el contrario la tierra, con una temperatura media en superficie de alrededor de 15°C , emite radiación de mayor longitud de onda, principalmente en la banda de 4.0 a 100μ , en el infrarrojo. La máxima intensidad se registra hacia los 10μ .

La radiación emitida por la tierra, incluyendo su atmósfera, se conoce como la radiación terrestre y comprende la radiación emitida por la superficie de la tierra y la emitida por la atmósfera. (5). Cabe anotar que los gases atmosféricos emiten una radiación particular, una parte de la cual es devuelta a la superficie del globo.

La figura 1.3, tomada de la referencia bibliográfica No. 5, muestra la relación existente entre las distribuciones espectrales de la radiación solar y la terrestre.

Cerca del 90% de la radiación terrestre es absorbida por el vapor de agua, el ozono, el CO_2 y las nubes. La radiación emitida por la tierra sólo pasa directamente al espacio, a través de la llamada "ventana atmosférica", la cual está ubicada entre 8μ y 13μ . De este modo se estima que apenas de un 10 a un 12% de la radiación terrestre se pierde en el espacio. (1), (2) y (5).

Una parte apreciable de la radiación absorbida por la atmósfera es radiada de vuelta a la superficie y esto previene el excesivo enfriamiento de la tierra en las noches. La intensidad de esta "contraradiación" varía con la temperatura del aire, el contenido de vapor de agua en la atmósfera y la cobertura nubosa.

La diferencia entre la radiación terrestre emitida y la radiación que es radiada de vuelta por la atmósfera, se conoce como la "radiación saliente efectiva".

La medición instrumental de la radiación saliente efectiva no es muy frecuente, aún cuando tal información es importante en estudios agrometeorológicos que se realizan en micro o mesoescala. Por ello, diversos investigadores han desarrollado fórmulas empíricas para su cálculo. Una de ellas es la de Brunt (1), que presenta la siguiente forma:

$$Q_b = \sigma T^4 (0.56 - 0.09 \sqrt{e}) (1 - ac)$$

Donde: Q_b es la radiación saliente efectiva

σ es la constante de Stefan-Boltzmann

T es la temperatura absoluta del aire cerca de la superficie

e es la tensión del vapor en milibares

c es la nubosidad

a es una constante que depende del tipo de nubes;

0.025, 0.06 y 0.09 para nubes altas, medias y bajas, respectivamente.

Otra fórmula de gran valor para el cálculo de la radiación saliente efectiva, es la de Angstrom-Asklof (2), la cual viene dada por:

$$Q_b = \sigma T^4 (A + B \cdot 10^{-rP}) (1 - KW)$$

Donde: A, B y r son constantes empíricas, cuyos valores son 0.23, 0.26 y 0.074, respectivamente.

P es la tensión de vapor cerca del suelo, en milímetros.

W es la nubosidad (W=0 sin nubes; W=1 cielo cubierto).

K es una constante, cuyo valor depende del tipo y altura de nubes; Algunos valores sugeridos son $K = 0.76$, para nubes bajas, densas, (A_c, S_c, N_s, S_t); $K = 0.52$ para nubes altas y menos densas (A_c, A_s, C_s); $K = 0.26$ para nubes "ligeras" del tipo cirrus.

1.8.- Radiación Neta

Se llega al epílogo del estudio de la radiación, como es el análisis del balance final de la radiación, del cual surge el porcentaje de aquella que realmente quedará disponible para los cultivos, luego de ocurridos los diversos procesos de absorción, difusión, reflexión, etc.

La radiación neta se puede definir como la diferencia entre los flujos totales descendentes y ascendentes de radiación, lo cual constituye una medida de la energía disponible en la superficie del suelo (1) y (6).

La ecuación general del balance de radiación se puede expresar así:

$$Q_n = (1 - r) Q + Q_b$$

Donde:

Q_n es la radiación neta

r es el coeficiente de reflexión

Q es la radiación incidente de onda corta

Q_b es la radiación neta de onda larga.

En el invierno, la radiación neta es negativa en latitudes medias y altas, registrandose un valor mínimo de cerca de -30 langleys por día en las áreas continentales y de -40 a -50 langleys/día en regiones costeras. En los trópicos y durante el verano en latitudes medias y altas, se presenta una buena relación lineal entre la radiación neta

y la incidente (1). En efecto, Shaw, citado por Chang, encontró la siguiente relación para las horas diurnas, en una investigación de pasturas en Iowa (USA).

$$Q_n = 0.87 Q - 82.0 \quad (\text{en días despejados})$$

$$Q_n = 0.75 Q - 21.4 \quad (\text{en días nublados})$$

Donde Q_n es la radiación neta desde media hora después de la salida del sol, hasta media hora antes de ocultarse.

Q = radiación global total diaria

La radiación neta es negativa durante la noche; llega a ser positiva durante el día, desde media hora después de la salida del sol, hasta una hora antes de ponerse. Teniendo en cuenta que la vegetación de porte alto tiene una superficie generalmente más rugosa y una mayor capacidad de absorción de calor, retiene una mayor porción de radiación neta que la de porte bajo. De este modo, se ha encontrado que la radiación neta es inferior en un 12% en algunas pasturas, en relación al maíz.

1.9.- Utilización de la Radiación por los Cultivos

Como se anotó en la introducción de este capítulo, la **energía solar** juega un papel preponderante en la fotosíntesis, proceso mediante el cual las plantas producen la mayor parte de su materia seca.

Conviene recordar el proceso fotosintético:



Se pueden distinguir tres procesos básicos en la fotosíntesis (1):

- a) Un proceso difusivo, mediante el cual se transporta el CO_2 del aire externo hacia los centros de reacción en los cloroplastos. Este proceso depende fundamentalmente de la concentración de CO_2 en la atmósfera.
- b) Un proceso fotoquímico que produce la conversión de energía lumínica en energía química que pueda ser usada para la reducción del CO_2 en carbohidratos. Este proceso es influenciado solo por la luz.
- c) Los procesos bioquímicos en los cuales la energía producida por la conversión de luz, se utiliza para la reducción del CO_2 . Estos procesos son afectados fuertemente por la temperatura, pero no por la luz.

Es importante ahora anotar que las plantas utilizan la energía solar en forma muy poco eficiente, fundamentalmente por tres razones:

- 1) Como se vió en la sección 1.5.3., una parte de la radiación solar es reflejada por la cobertura vegetal y además, tan solo la luz visible participa activamente en la fotosíntesis.
 - 2) El requerimiento energético (de quantums) para la fotosíntesis es mucho mayor que su requerimiento teórico. En efecto se ha calculado que se requieren aproximadamente 118 Kilocalorías para reducir una molécula de CO_2 a su nivel de reducción en que se halla en los carbohidratos y a pesar de ello, los requerimientos energéticos para la fotosíntesis son cerca de tres veces más altos. Ello demuestra que existe un 'derróche' energético considerable en la fotosíntesis. (7).
- Una vez completado el proceso fotosintético, la energía excedente es liberada en forma de calor.

- 3) Las hojas de las plantas alcanzan su punto de saturación lumínica, muy lejos del punto máximo de intensidad lumínica. La actividad fotosintética de la mayoría de las hojas se incrementa con la intensidad de la luz sólo durante un pequeño rango, pero luego no responde a un mayor aumento en dicha intensidad.

La eficiencia de la utilización de la radiación por las plantas se puede calcular comparando los valores calóricos de la materia orgánica producida por unidad de área cultivada, con la radiación incidente en dicha área en el mismo período. Diversos investigadores han encontrado que la mayoría de los cultivos convierten menos del 1% de la radiación solar total incidente en materia orgánica.

Con base en la relación anotada, se han desarrollado diversos métodos para estimar el crecimiento de las plantas, con base en la energía lumínica recibida. De este modo, C.T. de Witt, encontró que en Holanda el potencial de producción fotosintética es de 5 g de $\text{CH}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{día}$ en diciembre (cuando se registran los valores mínimos de radiación solar), mientras que en Junio (cuando ocurren los máximos de radiación) dicho potencial aumenta a 29 $\text{g}/\text{m}^2/\text{día}$.

1.10.- BIBLIOGRAFIA DEL CAPITULO

- 1.- Chang, J.H. 1971. Climate And Agriculture. An ecological survey. Aldine Publishing Company.
- 2.- Geiger, R. 1950. The climate near the ground. Harvard University Press. Cambridge, Massachusetts.
- 3.- Haurwitz, B. 1941. Dynamic Meteorology. Mc Graw - Hill Book Company Inc.
- 4.- Organización Meteorológica Mundial. 1973. Compendio de apuntes para la formación del personal meteorológico. de la clase IV. Volúmenes I y II.
- 5.- World Meteorological Organization. 1973. Compendium of Meteorology for use by class I and class II meteorological personal. Volúmen I, part 2- Physical meteorology.
- 6.- World Meteorological Organization. 1971. Guide to Meteorological Instrument and Observing Practices.
- 7.- Salisbury, F. and Ross, C. 1969. Plant Physiology. Wads - Worth Publishing Company, Inc.

CURSO DE AGROMETEOROLOGIA

C A P I T U L O I I

FUNDAMENTOS DE ESTADISTICA

2.1.- IMPORTANCIA:

La actividad básica que se realiza en las estaciones agrometeorológicas permite la recolección de un gran volumen de datos relacionados con el clima y la agricultura de las diferentes regiones de un país. Sin embargo, tales datos se deben procesar y analizar convenientemente, antes de que se llegue a emitir un juicio adecuado sobre las condiciones agroclimáticas de cada región en particular. Ello implica que no es suficiente contar con los valores medios y extremos calculados de los diferentes parámetros.

La estadística es la herramienta valiosa que se utiliza para el adecuado análisis de todos los datos agrometeorológicos disponibles. A través de ella es posible establecer relaciones válidas entre los diferentes elementos en consideración y llegar a conclusiones racionales sobre la naturaleza y los alcances de dichas relaciones. Por ello, su estudio es de vital importancia en la Meteorología Agrícola.

Los diferentes aspectos que se estudiarán en el presente capítulo ilustrarán a los participantes del Curso sobre algunos de los métodos estadísticos que podrían luego utilizar en sus diversos trabajos y, en todo caso, les suministrarán las bases suficientes para orientar en forma correcta dichos trabajos.

2.2.- Algunos Conceptos Fundamentales

2.2.1 En estadística, el término "población" significa el conjunto de todos los elementos que tienen un cierto carácter común.

Una población puede ser finita o infinita. La población consistente de todos los vehículos que produce cierta fábrica en un año determinado es finita, mientras que la población formada por todos los posibles sucesos en tiradas sucesivas de una moneda es infinita.

2.2.2 El término "muestra" de una población, se refiere a un cierto número de individuos o casos de la población total, generalmente muy inferior en cantidad a dicha población.

Una lectura de la temperatura del aire a las 12 h. del día 1° de Agosto de 1900, puede entonces ser considerada como una muestra tomada de una población infinita compuesta de las observaciones, es muy importante establecer claramente los límites de la población que representan.

Una muestra que consiste de varias observaciones nos permite estimar la variabilidad de la población y sacar conclusiones importantes acerca de la misma. Toda la climatología se basa en el estudio de tales muestras (1), (2), (6).

Una muestra compuesta de N observaciones se dice que tiende a aproximarse a la población universal cuando N es igual o superior a 30. Por razones prácticas, en meteorología una muestra compuesta de 30 o más observaciones, se considera "grande". (1).

2.2.3 Toda población posee ciertos valores característicos llamados "parámetros", los cuales describen la población, tales como la media aritmética, la varianza, etc.

2.2.4 A su vez, toda muestra posee también valores que la describen, llamados "estadísticos", como la media aritmética, la desviación típica, etc.

El cálculo de los estadísticos es, entonces, una manera de estimar los parámetros, ya que estos no pueden ser conocidos con certeza.

2.2.5 Se conoce como "variable" a todo símbolo, tal como x , λ , etc., o cantidad cuyo valor puede cambiar. Si la variable puede tomar un solo valor, se llama constante.

- 2.2.6 Si una variable puede tomar cualquier valor entre dos valores dados, se dice que es continua. Por el contrario, si no puede tomar más que ciertos valores, se llama discreta. De este modo, la lluvia total en 24 horas o la temperatura del aire son variables climáticas continuas (la lluvia puede tomar valores como 18,2 o 18,3 mm y T° puede ser 14.2 o 14.3 $^{\circ}\text{C}$), mientras que la nubosidad expresada en octas es una variable discreta ya que sólo puede tener como valores 0, 1, 2, 3, etc.
- 2.2.7 Las variaciones que pueden expresarse simplemente por un número, según una unidad apropiada, se llaman variables escalares. La mayoría de las observaciones se representan por cantidades escalares, ya que tienen magnitud o dirección, pero no es una combinación de las dos. Tal es el caso de la temperatura, la humedad relativa, etc.
- 2.2.8 Por el contrario, cuando se combinan la dirección y velocidad de una variable, se dice que ella es vectorial, como es el caso del viento.

2.3.- Distribuciones de Frecuencia

La distribución de frecuencia es la herramienta básica para describir y analizar la población. Esto se efectúa en la práctica mediante la estimación de las características de la distribución de frecuencia de la población a partir de las muestras o series climatológicas.

Cuando se utiliza este tipo de análisis, se distribuyen primero los datos en clases o categorías y se determina el número de casos o individuos pertenecientes a cada clase; este se conoce como la frecuencia de clase. A continuación se ordenan y reúnen las clases con sus respectivas frecuencias en una tabla; de este modo se ha preparado una tabla de frecuencias, que se llama corrientemente distribución de frecuencias.

La tabla 2.1 muestra la distribución de frecuencias de las alturas (en cm) de las funcionarias del Servicio Meteorológico de un país. x.

TABLA 2.1

<u>Altura (cm)</u>	<u>Número de Funcionarias</u>
146-150	8
151-155	12
156-160	15
161-165	10
166-170	4
171-175	<u>2</u>
	Total 51

En este ejemplo la primera clase comprende las alturas entre 146 y 150 cm y su frecuencia de clase (número de casos) es de 8.

Una clase queda definida al fijar sus valores extremos y todo dato comprendido entre esos dos valores se dice que pertenece a la clase. Las diferentes divisiones en que se agrupan las clases se llaman intervalos de clases y los números extremos de cada intervalo se llaman Límites de clases. En el ejemplo citado, 146 y 150 son sus límites inferior y superior.

Se recomienda que el número de intervalos de clase oscile entre 5 y 20, dependiendo por supuesto de los datos. (10-20).

Al agrupar los datos disponibles en una tabla de frecuencia, se deberían tomar en cuenta las siguientes recomendaciones (2):

- Determinar el mayor y el menor valor registrado, con lo cual se encuentra el rango.

- b) Dividir el rango en un número conveniente de intervalos de clase de diferente tamaño o intervalos abiertos.
- c) Determinar el número de observaciones que caen dentro de cada intervalo de clase, es decir, encontrar las frecuencias de clase.

El procedimiento usado para dividir los datos en intervalos de clase se ilustra adecuadamente en la nota técnica No. 81 de la OMM (4), en la cual se aprecia- en su capítulo I - una distribución de frecuencias de la precipitación de agosto, registrada en Ginebra (Suiza) entre los años 1927 y 1950.

Si las frecuencias de clase (f) se plotean en diagramas o gráficas de bloques, en los cuales éstos sean proporcionales a los valores de f , se obtienen los histogramas de los elementos climáticos bajo análisis.

Por otra parte, si los valores de f se dividen por el número total (n) de casos o individuos, los valores resultantes se conocen como las frecuencias relativas de cada intervalo de clase. Estos valores, a su vez, son estimaciones de las posibilidades de ocurrencia de los elementos de la población en los diversos intervalos de clase.

Véase al respecto el ejemplo siguiente (Tabla 2.2.).

TABLA 2.2.

Frecuencia relativas de la precipitación de agosto, para Ginebra (Suiza).

P	f	f.r.	p	f	f.r.
0-19	1	0.033	140-159	4	0.133
20-39	1	0.033	160-179	1	0.033
40-59	6	0.200	180-199	0	0.000
60-79	5	0.166	200-219	1	0.033
80-99	2	0.066	220-239	0	0.000
100-119	6	0.200	240-259	1	0.033
120-139	2	0.066			
				30	

P = precipitación

f = frecuencia

f.r. = frecuencia relativa.

En este caso se observa que existe una probabilidad aproximada del 20% de que las lluvias mensuales de agosto oscilen entre 100 y 119 mm.

2.4.- La Distribución Acumulada

La frecuencia total de todos los valores menores que el límite superior de un intervalo de clase dado se conoce como su frecuencia acumulada hasta ese intervalo inclusivo. (2). Una tabla que represente las frecuencias acumuladas se llama distribución acumulada.

En la **tabla** 2.1. por ejemplo, la frecuencia acumulada hasta el intervalo de clase 161-165 es $8 + 12 + 15 + 10 = 45$, lo cual indica que 45 funcionarios tienen alturas menores a 165.5 cm.

En la práctica, frecuentemente es más importante determinar las probabilidades con respecto a algunos valores específicos que con relación a los intervalos de clase.

Estos últimos son un poco arbitrarios y "encubren" alguna parte de los valores de la muestra. Por ello, las tablas de frecuencias acumuladas se refieren usualmente a los datos individuales más que a las clases o intervalos de clase en que se pueden agrupar.

Para obtener la distribución acumulada, en primer lugar se ordenan los datos en forma secuencial, de menor a mayor. A continuación se calcula para cada valor su frecuencia relativa acumulada (F_{ra}), la cual se obtiene por la fórmula:

$$F_{ra} = \frac{m}{n + 1}$$

Donde m es el número que le ha correspondido al valor en el ordenamiento secuencial de la serie climatológica y n es el número total de términos en la serie climatológica. La división por ($n+1$), en lugar de n , da una estimación mejor de las probabilidades, especialmente hacia los finales de la distribución.

La nota técnica No. 81 de la OMM, trae el siguiente ejemplo al respecto:

Se pretende encontrar la distribución acumulada de los datos de lluvia de agosto para Ginebra (Suiza), correspondiente a los años de 1972 a 1986. Los valores originales son los siguientes:

Año	Lluvia de Agosto (mm)	Año	Lluvia de Agosto
1927	250	1942	48
1928	147	1943	41
1929	83	1944	44
1930	108	1945	133
1931	171	1946	158
1932	62	1947	54
1933	67	1948	72
1934	119	1949	49
1935	157	1950	110
1936	23	1951	100
1937	78	1952	125
1938	79	1953	57
1939	85	1954	206
1940	18	1955	107
1941	105	1956	144

Dichos valores se ordenan en forma ascendente y se calcula las frecuencias relativas acumuladas, con lo que se obtiene la Tabla 2.3.

TABLA 2.3.
Frecuencia acumulada; precipitación de agosto en Ginegra (Suiza)
1927-1956.

m	p	F	m	p	F	m	p	F
1	16	0.032	11	72	0.355	21	119	0.677
2	23	0.065	12	78	0.387	22	125	0.710
3	41	0.097	13	79	0.419	23	133	0.742
4	44	0.129	14	85	0.452	24	144	0.774
5	46	0.161	15	85	0.484	25	147	0.806
6	49	0.194	16	100	0.516	26	157	0.839
7	54	0.226	17	105	0.548	27	158	0.871
8	57	0.258	18	107	0.581	28	171	0.903
9	62	0.290	19	108	0.613	29	206	0.935
10	67	0.323	20	110	0.645	30	250	0.968

Los valores F equivalen a las probabilidades que la precipitación sea menor al valor respectivo p de la tabla. De este modo, la probabilidad que la precipitación sea menor a 65 mm es del 48.4% y que sea mayor a 65,, (1-F) es de 0.516, o sea del 51.6%. ✓

Por otra parte, la probabilidad que la lluvia fluctúe entre 62 y 125 mm es $0.710 - 0.290 = 0.420$, o sea el 42%. De acuerdo a lo anotado, la distribución acumulada da mucho mayor información que aquella que se puede obtener de los histogramas o de las tablas simples de frecuencia, ya que en este caso se utiliza toda la información disponible para estimar las probabilidades.

2.5.- Medidas de la Tendencia Central

Existen diversos valores "medios" o "promedios" que permiten describir la tendencia central de un conjunto de datos, por cuanto dichos valores tienden a situarse en el centro de la muestra ordenada según su magnitud.

Existen diversos estadísticos que se utilizan como medidas de la tendencia central, pero en este capítulo sólo se tratarán los tres más utilizados en la práctica: la media aritmética, la mediana y la moda.

2.5.1. La Media Aritmética

La media aritmética, comunmente llamada "la media" o "el promedio", constituye el estadístico utilizado con mayor frecuencia en climatología. Es el resultado de dividir la suma de los valores de todas las observaciones por el número de ellas. Se representa por $\bar{X}$ (X barra) y matemáticamente se expresa así:

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_N}{N} = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N} = \frac{\sum X}{N}$$

Si los números $X_1, X_2, \dots, X_K$ se presentan con frecuencias $F_1, F_2, \dots, F_K$, la media aritmética es:

$$\bar{X} = \frac{F_1 X_1 + F_2 X_2 + \dots + F_K X_K}{F_1 + F_2 + \dots + F_K} = \frac{\sum F X}{N}$$

En diversas ocasiones se dá a los valores $X_1, X_2, \dots, X_N$, cierto "peso" o valor relativo en razón a su mayor o menor importancia dentro de cierto grupo de datos y en este caso:

$$\bar{X} = \frac{W_1 X_1 + W_2 X_2 + \dots + W_K X_K}{W_1 + W_2 + \dots + W_K} = \frac{\sum W X}{\sum W}$$

Donde W_i es el "peso" que se otorga a cada valor en particular.

Por ejemplo, en varios países de Europa y América Latina, la media diaria de temperatura se calcula así:

$$\bar{x} = \frac{T_7 + T_{13} + 2 T_{21}}{4}$$

Se observa que en este caso se da doble peso a la observación de las 21 h, lo cual se ha demostrado válido en la práctica (1). En climatología se utilizan dos tipos de medias, cuando se comparan las condiciones climáticas de diversos lugares. El llamado "promedio de un período" se refiere a la media de un elemento climático, calculada a partir de una serie continua de por lo menos diez años. Por otro lado, la "normal climatología", se define como el promedio de una serie continua de observaciones de un elemento climático, durante un período especificado de 30 años (6).

2.5.2. La Mediana

La mediana de una serie ordenada de datos es el valor medio o la media aritmética de los dos valores medios; en otras palabras, es aquel valor que tiene "por encima" y "por debajo" igual cantidad de valores. Cuando se dispone de un número relativamente pequeño de observaciones, la mediana es el estadístico más representativo de la muestra.

Aún cuando la media se utiliza con mucha frecuencia en los análisis climatológicos, se puede presentar el caso de series relativamente cortas, donde un evento extraordinario distorsiona el valor de la media, más no el de la mediana. En efecto, véase la media y la mediana de la siguiente serie de precipitación:

Mes de Abril:

AÑO	Precipitación (mm)
1950	85 -
51	64 -
52	100
53	80 -
54	52 -
55	30 -
56	96 -
57	61 -
58	77 -
59	495 -

media = 111.6 mm

mediana = 78.5 mm

Se observa que el valor del año 1959 no guarda proporción alguna con los demás e influye para que la media aritmética sea superior a los volúmenes pluviométricos de nueve meses sobre un total de 10. Tal hecho sin embargo no afecta a la mediana, la cual se podría considerar en este caso más respresentativa de la tendencia central. El ejemplo anterior corresponde a una situación real experimentada en Uruguay, donde las precipitaciones anormalmente altas del año 1959 ocasionaron serenos estragos.

2.5.3 La Moda

La moda en una serie de valores de la variable, es aquel que se presenta con mayor frecuencia o sea el más común. La moda no siempre se presenta y en algunos casos pueden existir varias modas. Una distribución que tiene una sola moda se llama unimodal; en caso de tener dos modas se llamaría bimodal.

La moda puede ser muy útil cuando en determinado caso es preciso elegir un valor único, que puede realmente observarse. Por ejemplo, en el siguiente grupo de datos de nubosidad:

nubosidad en octas: 0; 6; 5; 4; 3; 7; 3; 2

La media es de 3.7; la mediana: 3.5

La moda: 3

Se observa que el único valor que corresponde a lo observado en una estación, es el de la moda con 3 octas.

2.5.4 Ventajas relativas de la Media y Mediana

Además de lo ya anotado, Brooks y Carruthers (1), presentan las siguientes ventajas relativas de la media:

- a.- La media es el estadístico más conveniente de referencia para analizar las fluctuaciones, dado que para el período cubierto por la media la suma de las fluctuaciones con respecto a ese valor es igual a cero. Por esa razón es el único nivel de referencia útil para mostrar las tendencias de los desvíos .
- b.- La media se calcula más fácilmente que la mediana a partir de una serie dada de valores, ya que no hay que efectuar ningún ordenamiento de los datos.
- c.- Las medias para períodos diferentes se pueden combinar fácilmente mientras que las medianas no.
- d.- La media es más estable que la mediana.

No obstante lo anterior, cuando la distribución contiene características anormales la media puede no ser un estadístico representativo. Tal es el caso de climas áridos o sub-áridos donde determinadas lluvias pueden ocasionar distorsiones en los promedios.

Por otra parte, las ventajas relativas de la mediana son:

- a.- La mediana es representativa casi siempre y usualmente da una mayor medida de la expectativa que la media, dado que la mitad de las observaciones caen a cada lado de ella.
- b.- La mediana se puede utilizar frecuentemente en casos en los que algunas observaciones no tienen un valor definido. Por ejemplo, las fechas medias de ocurrencia de la primera y la última helada no se pueden calcular si en algún invierno (u otoño) no hay heladas. Si se ignoran estos años y se calcula la media para los años restantes, se obtiene una representación "arreglada". La fecha mediana es representativa siempre y cuando menos de la mitad de los inviernos presenten períodos libres de heladas.

2.6.- Medidas de la Dispersión

Al contrario de lo visto en la sección anterior, existen estadísticas que describen el grado en que los datos numéricos tienden a extenderse alrededor de un valor medio de la muestra. Dichos estadísticos se utilizan como "medidas de la dispersión" y a continuación se analizarán las tres más utilizadas: el rango, la desviación media y la desviación típica.

2.6.1 El Rango

Una medida rápida y aproximada de la dispersión de un grupo de observaciones la constituye la diferencia entre el valor más alto y el más bajo, lo cual se conoce como el rango. Presenta varias desventajas, entre las cuales se puede mencionar que dicho estadístico tiende a incrementarse con un aumento en el número de observaciones.

2.6.2 La desviación media

Se la define como la media aritmética de las desviaciones absolutas de cada una de las observaciones con respecto a la media de la muestra. Se entiende que el valor absoluto de un número es el mismo número sin tener en cuenta su signo algebraico, ya sea positivo o negativo.

De este modo:

$$MD = \frac{|X_1 - \bar{X}| + |X_2 - \bar{X}| + \dots + |X_m - \bar{X}|}{N} = \frac{\sum |X - \bar{X}|}{N}$$

Donde:

MD = Desviación media

$\bar{X}$ = media aritmética de los valores

$|X_m - \bar{X}|$ = valor absoluto de la desviación del valor con relación a la $\bar{X}$.

Véase el siguiente ejemplo, tomado de la referencia bibliográfica No. 2 del capítulo: Hallar la desviación media de las siguientes series de datos: a) 12, 6, 7, 3, 15, 10, 18, 5

b) 9, 3, 6, 8, 9, 8, 9, 18

Solución

$$a) \quad \bar{X} = \frac{76}{8} = 9.5$$

$$MD = \frac{|12-9.5| + |6-9.5| + |7-9.5| + |3-9.5| + |15-9.5| + |10-9.5| + |18-9.5| + |5-9.5|}{8}$$

$$MD = \frac{34}{8} = 4.25$$

$$b.- \bar{X} = \frac{72}{8} = 9$$

$$MD = \frac{49-9 + 13-9 + 18-9 + 19-9 + 18-9 + 19-9 + 18-9}{8}$$

$$MD = 2.25$$

Se puede ver que la serie b) tiene menor dispersión que la serie a).

2.6.3. La desviación típica

La desviación típica y la media aritmética son consideradas las dos características más importantes de un grupo de observaciones y por ello se recomienda su inclusión en los resúmenes climáticos que no contengan los datos originales (6).

La desviación típica, representada por una s , está dada por la raíz cuadrada de la media de los cuadrados de todos los desvíos con respecto a la media aritmética. Se expresa así:

$$s = \sqrt{\frac{(\sum (X - \bar{X})^2)}{N}}$$

A veces la desviación típica de los datos de una muestra viene definida con $(N-1)$ en lugar de N en el denominador de la expresión matemática, porque el valor resultante representa un estimador mejor de la desviación típica de una población de la que se ha tomado la muestra. Para valores grandes de N (por ejemplo, $N > 30$), prácticamente no hay diferencia entre las dos definiciones (2).

Existen métodos cortos para calcular la desviación típica, como el siguiente

$$S = \sqrt{\frac{\sum X^2}{N} - \left(\frac{\sum X}{N}\right)^2}$$

Véase el siguiente ejemplo: calcular la desviación típica de la siguiente serie de datos de la precipitación: Mes: Febrero; sitio X.

<u>AÑO</u>	<u>P. (en mm)</u>
1960	47
61	38
62	72
63	60
64	55
65	32
66	69
67	80
68	44
69	53

a) Según la fórmula citada en primer lugar:

$$S = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{N}}$$

Entonces $\bar{x} = 55$

<u>$x - \bar{x}$</u>	<u>$(x - \bar{x})^2$</u>
-8	64
-17	289
17	289
5	25
0	0
-23	529
14	196
25	625
-11	121
-2	4

$$\sum = 2142$$

$$S = \sqrt{\frac{2142}{10}}$$

$$S = \sqrt{214.2} = 14.6$$

b) Según el método corto o "de calculadora" :

x^2
2209
1444
5184
3600
3025
1024
4761
6400
1936
2609
$\Sigma = 32392$

$$\frac{\Sigma x}{n} = 55 \quad \left(\frac{\Sigma x}{n} \right)^2 = 3025$$

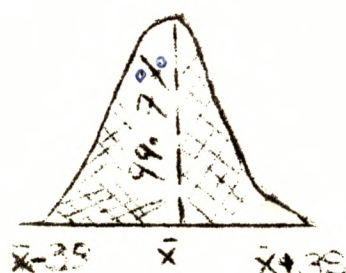
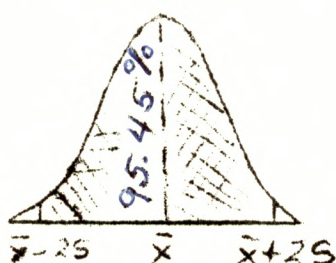
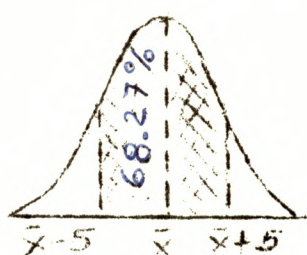
$$s = \sqrt{\frac{32392}{n} - 3025}$$

$$s = \sqrt{214.2} = 14.6$$

Un aspecto de especial importancia en los diferentes estudios estadísticos se relaciona con una de las propiedades de la desviación típica. En efecto para distribuciones normales resulta que:

- El 68,27 de los valores (o de los casos) está comprendido entre $x - s$ y $x + s$, o sea una vez el valor de la desviación típica a ambos lados de la media.
- El 95,45% de los casos están comprendido entre $x - 2s$ y $x + 2s$.
- El 99,73% de los valores están comprendidos entre $x - 3s$ y $x + 3s$.

Lo anterior se puede observar en la figura 2.1.



Para distribuciones moderadamente asimétricas , los porcentajes mencionados pueden mantenerse aproximados (2).

Por otra parte, en una distribución normal o moderadamente a simétrica, la desviación media (MD) y la desviación típica (S) presentan la siguiente relación:

$$s = 1.25 \text{ MD}$$

Tal relación se utiliza en ocasiones como un test para determinar la normalidad de una serie de observaciones.

2.6.4 El coeficiente de variación

Se define como el cociente de la desviación típica sobre la media aritmética:

$$C.V. = \frac{S}{\bar{X}}$$

Es importante para conocer la dispersión relativa de dos series de un mismo elemento, pero que tienen características diferentes. Por Ejemplo, una dispersión o variación de 10 centímetros en la medida de una distancia de 100 metros, tiene un efecto muy diferente al que tendría una igual variación pero en una distancia de 2 metros. Así mismo, una variación de 10 mm en totales pluviométricos del orden de 1.000 mm refleja condiciones bien distintas a igual variación pero en precipitaciones del orden de los 100 mm.

Lo anterior no se puede detectar con las desviaciones típicas mas sí con los coeficientes de variación y de ahí su importancia.

El coeficiente de variación es independiente de las unidades de medición y se utiliza frecuentemente como una medida de las variabilidades relativas de la precipitación en diferentes estaciones.

2.7.- Análisis de Correlación y Regresión

Hasta ahora se han analizado diferentes estadísticos que caracterizan a una muestra o sea a una serie de datos de un elemento en particular, como podría ser la precipitación, la temperatura media del aire, etc. Se verá en esta sección como se analiza la correlación o grado de relación existente entre dos variables y como se llega a predecir los valores que pueden tomar una variable según los cambios ocurridos en los valores de otra variable estrechamente relacionada con la primera.

Primero se examinarán algunos aspectos generales relacionados con el tema y luego se tratarán los puntos específicos de mayor importancia en el estudio de la regresión y la correlación estadística.

2.7.1 Aspectos generales sobre la relación entre dos variables

Ocurre frecuentemente que en diversos campos existe una relación estrecha entre dos o más variables. En meteorología, por ejemplo, existe una importante asociación entre la nubosidad y el brillo solar, entre la presión atmosférica y la precipitación, etc, e igualmente entre la precipitación o la humedad relativa registrada en estaciones meteorológicas cercanas. por ello, se busca expresar esta relación mediante una ecuación matemática que ligue las variables.

Antes de determinar tal ecuación, es útil representar los puntos simultáneos (X_1, Y_1) , (X_2, Y_2) , etc., en un sistema de coordenadas rectangulares; el sistema de puntos resultantes se llama comunmente un diagrama de dispersión.

Con dicho diagrama se puede encontrar una curva que se aproxime a los datos; dicha curva se denomina curva de aproximación.

Véase al respecto el diagrama de dispersión y la curva de aproximación mostrados en la figura 2.2.

En esta gráfica se observa que los datos tienden a formar una línea recta y por ello se puede expresar que existe una relación lineal entre las variables X e Y. Sin embargo, existen también relaciones no lineales.

Como referencia, se presentan a continuación varios tipos comunes de curvas de aproximación y sus ecuaciones. Todas las letras que sean distintas a X o Y, son constantes especiales. (2).

- a) $Y = a + bX$ Línea recta
 b) $Y = a + bX + cX^2$ Parábola o curva cuadrática
 c) $Y = ab^X$ Curva exponencial
 d) $Y = \frac{1}{a + bX}$ Hipérbola

2.7.2 Regresión

A través de los análisis de regresión se encuentra la relación funcional que existe entre dos variables y se posibilita la estimación de una de ellas en base a la otra. Para ello, los valores de la variable dependiente (Y) se calculan de la curva (o recta) de regresión, llamada también curva de mínimos cuadrados, la cual se ajusta según los datos existentes. Tal como se expuso en la sección anterior 2.7.1., la recta de regresión de mínimos cuadrados de Y sobre X es:

$$Y = a + bX$$

Donde:

$$a = \frac{(\sum Y) (\sum X^2) - (\sum X) (\sum XY)}{N \sum X^2 - (\sum X)^2}$$

$$b = \frac{N \sum XY - (\sum X) (\sum Y)}{N \sum X^2 - (\sum X)^2}$$

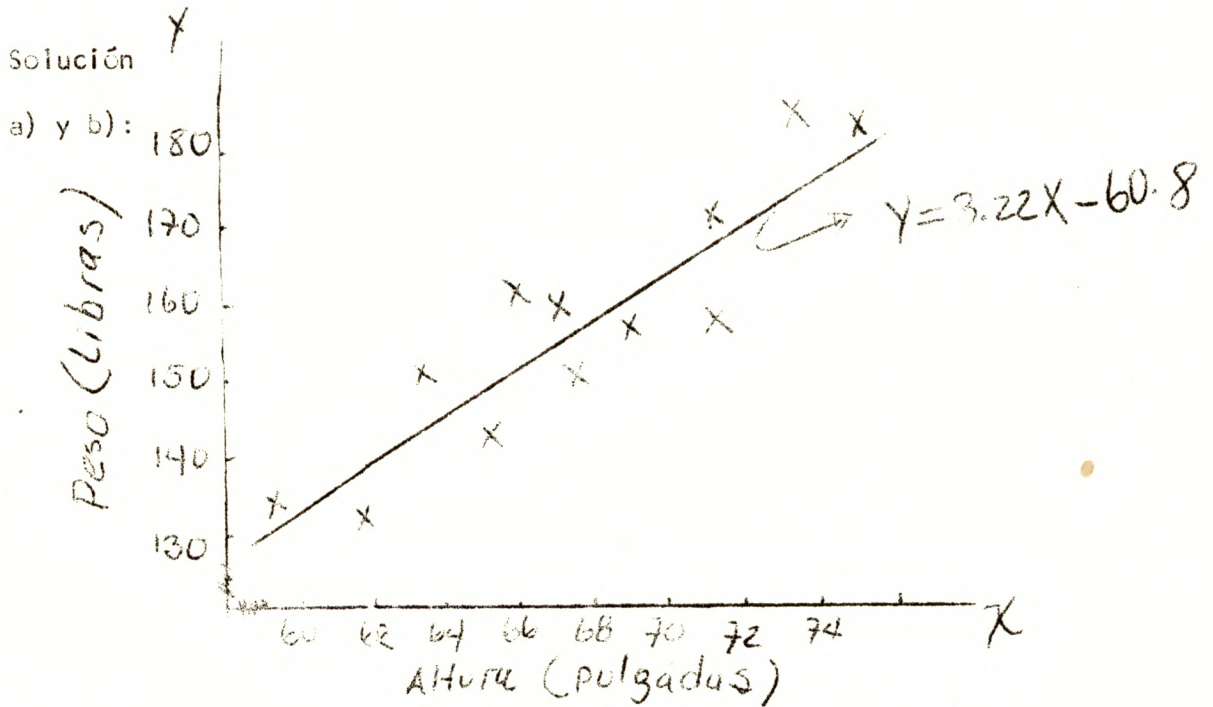
Una vez hallados los valores de a y b entonces es posible estimar cualquier valor para la variable dependiente (Y) con base en los valores que asume la variable independiente (X).

El siguiente ejemplo, tomado de la referencia bibliográfica No. 2, ilustra adecuadamente lo expuesto.

Se dan las alturas en pulgadas y los pesos en libras de 12 estudiantes extraídos al azar de entre los estudiantes de primer año de un colegio estatal; con dichos datos:

- Obtener el diagrama de dispersión de los datos
- Construir una recta que se aproxime a los datos
- Ajustar una recta de mínimos cuadrados.

Altura (X)	70	63	72	60	66	70	74	65	62	67	65	68
Peso (Y)	155	150	180	135	156	168	178	160	132	145	139	152



c)

X	Y	XY	X ²
70	155	10850	4900
63	150	9450	3969
72	180	12960	5184
60	135	8100	3600
66	156	10296	4356
70	168	11760	4900
74	178	13172	5476
65	160	10400	4225
62	132	8184	3844
67	145	9715	4489
65	139	9035	4225
68	152	10336	4624

$$\sum X = 802 \quad \sum Y = 1850 \quad \sum XY = 124258 \quad \sum X^2 = 53792$$

$$\bar{X} = 60.8 \quad \bar{Y} = 154.2$$

$$a = \frac{(1850)(53792) - (802)(124258)}{(12)(53792) - (802)^2} = \frac{99515200 - 99654916}{645504 - 643204}$$

$$a = \frac{-139716}{2300} = -60.8$$

$$b = \frac{(12)(124258) - (802)(1850)}{(12)(53792) - (802)^2} = \frac{1491096 - 1483700}{2300}$$

$$b = \frac{7396}{2300} = 3.22$$

Entonces, la recta de regresión $Y = a + bX$, será:

$$Y = -60.8 + 3.22X$$

o sea

$$Y = 3.22X - 60.8$$

Si se desea, por ejemplo, estimar el peso de un estudiante de 63 pulgadas de altura, entonces:

$$Y = 3.22 (63) - 60.8$$

$$Y = 202.9 - 60.8 = \underline{142.1} \text{ libras}$$

Los análisis de regresión tienen una gran importancia en el campo climatológico, ya que permiten establecer la relación existente entre dos variables meteorológicas dadas o entre los datos de las estaciones meteorológicas más o menos próximas y facilitan la estimación de datos de ciertos elementos climático o de determinada estación, a partir de otros valores con los cuales guardan relación.

2.7.3. Correlación

Se analizó en la sección anterior la estimación de los valores de una variable con base en los valores de otra variable con la cual está relacionada. Se tratará ahora el procedimiento utilizado para cuantificar en qué medida están correlacionadas dos variables o sea hasta que grado una ecuación de regresión explica la asociación existente entre dos series de datos.

Si en un diagrama de dispersión los puntos parecen estar cerca de una recta, se dice que existe una correlación lineal entre las dos variables. Si los valores de Y tienden a incrementarse cuando se incrementan los de X , la correlación es positiva (figura 2.3.1). En cambio, si los valores de Y tienden a disminuir cuando se aumentan los de X , la correlación es negativa (figura 2.3.2). En caso de no existir ninguna relación entre las variables (figura 2.3.3.), entonces se dice que no existe correlación entre aquellas.

El grado de correlación que existe entre dos variables se obtiene a través del coeficiente de correlación (r). La fórmula para determinar el coeficiente de correlación se puede expresar en la siguiente forma:

$$r = \frac{N \sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{[N \sum X^2 - (\sum X)^2][N \sum Y^2 - (\sum Y)^2]}} \quad (\text{Fórmula corta para cálculos})$$

Los valores de r fluctúan entre -1 y $+1$, según la correlación sea negativa o positiva. Se debe anotar que r es una cantidad adimensional, es decir que no depende de las unidades empleadas.

A menos que se especifique lo contrario, el coeficiente de correlación se utiliza como medida de la correlación lineal entre dos variables. Por ello, cuando r es muy bajo o próximo a 0 (cero) significa que no existe casi ninguna correlación lineal entre las variables, pero a pesar de ello podría existir una alta correlación de otro tipo entre ellas, tal como parabólica, exponencial, etc.

A continuación se presentará un ejemplo sobre cómo se determina el coeficiente de correlación:

Encontrar el coeficiente de correlación (r) para el problema planteado en el punto anterior 2.7.2. "regresión". Dicho problema aludía a las alturas y los pesos de 12 estudiantes, así:

Altura (X) en pulgadas: 70, 63, 72, 60, 66, 70, 74, 65, 62, 67, 65, 68

Peso (Y) en libras: 155, 150, 180, 135, 156, 168, 178, 160, 132, 145, 139, 152.

Entonces:

$$r = \frac{N \sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{[N \sum X^2 - (\sum X)^2][N \sum Y^2 - (\sum Y)^2]}}$$

Del problema anterior se sabe que:

$$\sum x = 802 \quad \sum y = 1850 \quad \sum xy = 124258$$

$$\sum x^2 = 53792 \quad (\sum x)^2 = 643204$$

Sólo falta averiguar $(\sum y)^2$ y $\sum y^2$

Entonces:

y	y ²
155	24025
150	22500
180	32400
135	18225
156	24336
168	28224
178	31684
150	25600
132	17424
145	21025
139	19321
152	23104
$\sum : 1850$	$\sum : 287868$
$(\sum y)^2 : 3422500$	

Entonces:

$$r = \frac{(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[(\sum x^2) - (\sum x)^2] [\sum y^2 - (\sum y)^2]}}$$

$$r = \frac{1491056 - 1483700}{\sqrt{(2300)(31916)}}$$

$$r = \frac{7396}{8568} = 0.86$$

Es importante ahora anotar que la significación de un coeficiente de correlación no viene dada únicamente por su valor numérico, sino que también depende del número de pares de valores a partir de los cuales se ha calculado. En efecto, tiene diferente significación un coeficiente de correlación igual a 0.70 que haya sido calculado a partir de 12 pares de valores a uno igual pero estimado con base en 24 pares de datos.

La metodología para decidir si un determinado valor de r es o no significativo, es tema que pertenece a un curso de estadística más avanzado, pero, en pocas palabras, se basa en establecer una "hipótesis nula" que expresa que las variables no guardan relación entre sí, luego de lo cual se acepta o rechaza dicha hipótesis. Se invita a los interesados en profundizar sobre este aspecto, a leer lo relacionado con las pruebas o tests de significancia en las referencias bibliográficas citadas al final de este capítulo.

2.7.4. Importancia climatológica de los análisis de regresión y correlación

Tal como se ha mencionado a través de este capítulo, la correlación y la regresión son importantes para establecer si existe una relación significativa entre diversos parámetros meteorológicos, entre los datos climatológicos de diferentes estaciones o entre diversos fenómenos atmosféricos y biológicos.

Asimismo, aquellos análisis tienen una gran utilidad en la estimación de valores climatológicos faltantes en una serie de datos, cuando previamente se ha establecido una correlación entre el elemento climatológico en cuestión y otro que guarda relación con aquel.

También se utilizan las técnicas de regresión y correlación para redistribuir adecuadamente una red climatológica, agrometeorológica, pluviométrica, etc., ya que si existe un grado de correlación muy alto entre los datos originados en estaciones cercanas, ello podría significar que una de ellas está de más.

2.8. Bibliografía del Capítulo

- 1.- Brooks, C.E.P. y Carruthers, N. 1953. Handbook of Statistical Methods in Meteorology. London: Her Majesty's Stationery Office.
- 2.- Spiegel, M. 1976. Teoría y Problemas de Estadística. Serie de Compendios Schaum - Mc Graw Hill.
- 3.- Organización Meteorológica Mundial. 1970. Guía de Prácticas Climatológicas. OMM - No. 100 TP. 44.
- 4.- World Meteorological Organization. 1966. Some Methods of Climatological Analysis. By H.C.S. Thom. Technical note No. 81. WMO No. 199. TP. 103.
- 5.- World Meteorological Organization. 1972. Compendium of lecture notes in Climatology for class III Meteorological Personnel. WMO- NO. 335.
- 6.- World Meteorological Organization. 1972. Compendium of Lecture notes in Climatology for Class IV Meteorological Personnel. WMO- No. 327.



CURSO DE AGROMETEOROLOGIA

C A P I T U L O I I I

ESTACIONES, OBSERVACIONES E INSTRUMENTO AGROMETEOROLOGICOS

3.1. La Estación Agrometeorológica, Requisitos Generales.

Una estación meteorológica es aquel lugar en el cual se efectúan mediciones u observaciones de uno o de varios elementos meteorológicos. De igual manera, se puede expresar que una estación agrometeorológica es el sitio, generalmente localizado en un área de interés agropecuario, en el cual se realizan observaciones y mediciones tanto de elementos meteorológicos como biológicos, con el fin de determinar los efectos del tiempo atmosférico sobre las plantas y los animales. Lo anterior implica que en una estación agrometeorológica se deben efectuar observaciones tanto de las condiciones físicas de la atmósfera y de las capas superiores del suelo, como de eventos biológicos tales como el crecimiento de plantas y animales, la ocurrencia de plagas y enfermedades en cultivos y ganados, la aparición de los signos visibles de las distintas etapas de desarrollo de las plantas (emergencia, floración, fructificación), etc. La cantidad y la frecuencia de las observaciones que se efectúan en una estación agrometeorológica determinada, dependen de los fines con los cuales se instaló y del uso que se dé a los datos allí recolectados. En efecto, si se instala una estación como parte de la infraestructura de una investigación agropecuaria, su programa de observaciones va a ser distinto del programa previsto para una estación agrometeorológica instalada con fines generales y como parte de una red nacional.

Es importante anotar que para las diversas aplicaciones agrometeorológicas, se hace uso con mucha frecuencia de la información acopiada en estaciones meteorológicas de otro tipo, como en las sinópticas, climatológicas y pluviométricas, ya que para numerosas actividades del agro son suficientes los valores de precipitación, temperatura del aire, humedad relativa, viento, brillo solar y evaporación, los que por supuesto se miden también en dichas estaciones.

Las estaciones agrometeorológicas deberían estar ubicadas en sitios su
ficientemente representativos de las condiciones de clima, suelo y cul-
tivos que prevalezcan en la zona y, de acuerdo a la Organización Meteorol-
ológica Mundial (6), es recomendable que se instalen preferentemente
en:

- a) Centros experimentales o de investigación con fines agrícolas, gana-
deros o forestales.
- b) Institutos Agrícolas (centros docentes superiores o intermedios);
- c) Institutos de ciencias del suelo;
- d) Areas de importancia agrícola;
- e) Areas de importancia forestal;
- f) Parques o reservas naturales;
- g) Area donde el clima afecta desfavorablemente el desarrollo de culti-
vos y ganado.

Se nota la preponderancia que se otorga a la localización de las esta-
ciones en centros de investigación agropecuaria, lo cual se justifica
plenamente en razón a que en tales centros los datos recolectados se
utilizan inmediatamente en los diferentes estudios en ejecución.

Cuando se procede a la selección del sitio específico en el cual se va
a instalar la estación (dentro de un centro experimental o un institut-
to docente agrario, por ejemplo), se deben seguir las normas generales
que tiene al respecto la OMM, como son:

- 1.- La estación no debería quedar próxima a obstáculos u obstrucciones
que afecten las observaciones, como árboles, edificaciones, torres,
etc.
- 2.- Tampoco debería estar cerca de carreteras o caminos.
- 3.- No debería establecerse en depresiones del terreno que ocasionen
condiciones microclimáticas distintas a las de la zona circundante.
- 4.- Se deberían evitar sitios próximos a laderas o desniveles topográ-
ficos apreciables.
- 5.- El suelo de la estación debería estar a igual nivel y cubierto
por césped que se corta a intervalos regulares.

No obstante lo anterior, un aspecto que se debe considerar con especial atención, se relaciona con la proximidad que debe existir entre la estación y el lugar de permanencia del observador. En efecto, se debe buscar que el sitio escogido para las mediciones sea fácilmente accesible para los potenciales observadores, ya que de lo contrario podrían surgir problemas de lecturas tomadas a horas distintas (por los eventuales retardos), observaciones no realizadas o, lo peor, datos no confiables. Ahora bien, cuando la información agrometeorológica se precisa como parte fundamental de una investigación que se efectúa sobre un cultivo en particular (p. eje. el estudio de la distribución de la radiación solar en el cultivo del maíz), los instrumentos meteorológicos deberían situarse entonces dentro del cultivo, bajo condiciones de exposición dependientes de la naturaleza de la investigación.

Por otra parte, a partir del momento en que se establece una estación agrometeorológica, es necesario determinar y consignar en la historia de la estación, información precisa sobre la vegetación predominante en la zona, exposición de cada uno de los instrumentos y datos relativos al suelo, tales como su textura, estructura, horizontes y las constantes físicas hasta una profundidad de al menos un metro (5). Dicha humedad del suelo en particular, y para los estudios de la inter-relación clima-suelo-cultivo, en general.

Así mismo, se recomienda tomar y conservar fotografías periódicas de cada estación, logradas desde diferentes direcciones. Ellas proporcionan numerosos detalles de interés para los análisis de homogeneidad de la series y para esclarecer aspectos de interés en determinados estudios.

3.2. Clasificación de las estaciones agrometeorológicas

De acuerdo con las regulaciones de la Organización Meteorológica Mundial (5), las estaciones agrometeorológicas se clasifican y definen de la siguiente manera:

3.2.1 Estaciones agrometeorológicas principales.

Son aquellas que suministran información meteorológica y biológica detallada y en las cuales se realizan investigaciones agrometeorológica.

La dotación de instrumentos, el rango y la frecuencia de las observaciones meteorológicas y biológicas y el personal profesional que labora en ellas, son tales que permiten la ejecución de investigaciones fundamentales sobre aspectos agrometeorológicos de interés para las regiones relacionadas.

3.2.2 Estaciones agrometeorológicas ordinarias.

En ellas se efectúan, en forma rutinaria, observaciones meteorológicas y biológicas y pueden estar equipadas para apoyar la ejecución de programas específicos de investigación; en general el programa de observaciones biológicas o fenológicas se establece de acuerdo a las condiciones climáticas locales.

3.2.3 Estaciones agrometeorológicas auxiliares.

Son aquellas que proveen información meteorológica y biológica de cierto tipo. La información meteorológica puede comprender items como la temperatura del suelo, la humedad del suelo, la evapotranspiración potencial, etc; la información biológica puede cubrir aspectos como la fenología, la aparición de determinadas enfermedades vegetales o animales, etc.

Se debe anotar que las estaciones agrometeorológicas que cumplen lo estipulado en 3.2.1 son muy escasas, incluso a nivel mundial, por lo cual la mayoría se pueden clasificar como ordinarias o auxiliares.

3.3. Criterios para la distribución de una red de estaciones agrometeorológicas.

Diferentes estudiosos de las ciencias meteorológicas han propuesto un variado número de métodos para el diseño de las redes meteorológicas generales o de las redes particulares para la medición de la precipitación, la radiación solar, etc. Dichos métodos van desde el uso de modelos numéricos para establecer el radio teórico de acción o de cubrimiento de cada estación, hasta la división de una región en zonas "sinópticas" o "climáticas", en cada una de las cuales se debería establecer una estación base y varias secundarias.

Con respecto a lo anterior, es importante advertir que no existe, ni puede existir, un método "único" que se pueda seguir sin un previo análisis, ya que las condiciones climáticas, agrícolas, edafológicas,