

# Centro de Investigaciones en Óptica, A.C.



TESIS DE MAESTRIA

**DESARROLLO E IMPLEMENTACION DE SENSORES PARA MEDIR POTENCIAL  
HIDRICO EN HOJAS DE PLANTA**

Presenta

VICTOR ENRIQUE GARCIA TERAN  
Ingeniero en Electrónica y Comunicaciones

Dirigida por

Dr. Hageo Dessirena Enriquez y Dr. Carlos Villaseñor Mora

Tesis para obtener el grado de Maestro en Optomecatrónica

LEON  
MEXICO  
Versión final

2014







## INTRODUCCION

En la actualidad existen diferentes sensores que permiten determinar el contenido de agua de algunos cuerpos u objetos, incluidos hojas de plantas, con ello, se han desarrollado tecnologías de captura y transmisión de información para monitorear por ejemplo, en una planta diferentes parámetros relacionados con la disponibilidad de agua, lo que permite conocer el estatus hídrico de la planta. Estas diferentes tecnologías de sensores permiten mantener el equilibrio dinámico de la disponibilidad hídrica.

El potencial hídrico foliar es una variable comúnmente utilizada para evaluar el estado hídrico de las plantas (Williams y Araujo, 2002; Schultz, 2003). El método estándar para realizar esta medición es el de la cámara de presión (Scholander *et al.*, 1965) que brinda valores precisos de potencial hídrico, pero tiene la desventaja de ser destructivo y lento.

La medida del estado hídrico de una planta es una herramienta útil por ejemplo, para la programación de riego en la producción agrícola, ya que el monitoreo de humedad del suelo y de la planta misma, permite producir cosechas de calidad.

La estimación del potencial hídrico se convierte en un aspecto importante para el desarrollo de métodos alternativos de medición, ya que los procedimientos, técnicas de campo y laboratorio que existen actualmente presentan desventajas, como:

- Deben ser calibrados.
- El personal debe estar adecuadamente capacitado para su utilización.
- Algunos no pueden utilizarse para automatizar el riego.
- Alto costo del aparato.
- Las medidas obtenidas indirectamente, deben calcularse para proporcionar los valores reales.
- Presentan dudas acerca de la veracidad de los datos obtenidos debido a cuestiones tecnológicas que pueden no estar reflejando el verdadero valor.

Estos son inconvenientes que limitan su uso, además de requerir la compra de equipo especializado.

El objeto principal de este trabajo fue el proponer una metodología para monitoreo de agua en plantas por medio de la interacción de la planta y radiación, a través de la energía reflejada para obtener información acerca del estado fisiológico de las plantas específicamente en hojas, ya que estas son el elemento más importante de las plantas. El procedimiento desarrollado tiene la ventaja de realizarse sin contacto físico, ya que aprovecha la medición de la energía reflejada por la hoja de una planta bajo estudio y que es alcanzada por un sensor.

La metodología propuesta está basada en termografía, realizando un análisis de la relación de la reflexión y emisión de la radiación infrarroja, y su correlación con el estudio de variaciones hídricas en donde se encontró una relación entre el tejido vegetal y la pérdida de humedad que experimentan las plantas.

Mediante esta metodología se pretende brindar una herramienta de detección, registro y análisis de las alteraciones en el comportamiento que experimentan las hojas al ser sometidas a un proceso de secado, ya sea natural o inducido, que permita caracterizar y evaluar el estado hídrico de las hojas.

El estudio de la reflectividad de hojas se llevó a cabo con varias especies de plantas con motivo de validar la metodología, al realizarse con diferentes tipos de hojas ya que todas ellas son diferentes en su fisiología y en la forma en que presentan su nivel hídrico.

Una ventaja adicional que se presenta en la metodología propuesta es que permite la medición a distancia o desde las alturas, y por medio de análisis de imagen determinar el estado hídrico de la planta.

Se encontró que la determinación del contenido de agua por medio de la reflectividad de las hojas de planta, es afectada por diferentes factores o variables. Estos factores se pueden dividir en dos grupos: el más evidente es el relacionado con la fisiología de las distintas especies vegetales, (Asner 1998), que causa una diferencia en la reflectividad de la hoja entre clase y clase de plantas, lo que causa una respuesta dispar a las condiciones de escasez hídrica. El segundo grupo de variables es común a toda medición, ya sea de vegetación o no, consiste en todos aquellos factores no biológicos, como son: atmosféricos e instrumentales, que influyen en las mediciones de reflectividad de un objeto de estudio dado, en este caso la vegetación (Milton 1987; Salisbury 1999).

<b>Índice general</b>	<b>pag.</b>
<b>INTRODUCCION</b> .....	5
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	10
<b>1.- INSTRUMENTOS DE MEDICION DE POTENCIAL HIDRICO.</b>	
1.1 Agua en plantas.....	13
1.2 Potencial hídrico y el movimiento de agua.....	13
1.3 Metodologías de monitoreo de potencial hídrico en plantas.....	14
1.4 Instrumentos de medición de potencial hídrico psicómetro termopar.....	14
1.5 Efecto termoeléctrico.....	14
1.5.1 Poder termoeléctrico.....	16
1.6 Relación entre humedad relativa y potencial de agua.....	16
1.6.1 Relación entre presión de vapor y temperatura.....	16
1.7 Calentamiento joule.....	17
1.8 Importancia de condiciones isotérmicas al hacer mediciones.....	17
1.9 Tipos de psicómetro termopar.....	18
1.10 Medición de potencial hídrico con cámaras de presión.....	20
1.10.1 Cámara de Scholander.....	20
1.10.2 Presa hidráulica.....	21
<b>2.-PRINCIPIOS BASICOS REVISION DE LITERATURA.</b>	
2.1. Espectro electromagnético.....	22.
2.1.1 Tipos de energía electromagnética.....	23
2.2. Interacción de la radiación y la materia.....	24
2.3. Propiedad espectral de las plantas.....	25
2.4. Reflectancia de plantas bajo condiciones de estrés.....	26
2.5. Factores que afectan la reflectancia en planta.....	27
2.5.1. Absorción de pigmentos.....	28
<b>3.- MEDICION RADIOMETRICA TERMOGRAFIA</b>	
3.1. Teoría termografica.....	29
3.2. Medición radiometrica.....	29

3.3. Emisión, reflexión y transmisión en termografía.....	29
3.4. Detectores infrarrojos.....	30
3.5. La cámara instrumento de medición.....	30
3.6. Termografía activa.....	31
3.7. Medidas de reflectividad.....	32
3.8. Termografía infrarroja en plantas.....	32
3.9. Región infrarroja asociada al contenido de agua.....	32
<b>4.- METODOLOGIA</b>	
4.1 Objetivo.....	35
4.2 Etapas del experimento.....	35
4.3 Fuente de infrarrojo.....	36
4.4 Arreglo de fuente de excitación térmica .....	37
4.5 Instalación de cámara.....	38
4.6 Obtención de imágenes y procesamiento digital de imágenes.....	38
4.7 Reflectancia a partir de imágenes.....	39
4.7.1 Margen de utilidad.....	39
4.7.2 Control de reflectividad de fondo.....	41
4.7.3 Proceso de secado de hojas .....	42
4.7.4 Pesado de hojas .....	43
4.7.5 Cálculo de reflectancia.....	43
4.8 Análisis de datos.....	44
<b>5.- RESULTADOS</b>	
5.1 Especies medidas.....	46
5.2 Resultados de mediciones.....	46
5.2.1 Reflectancia de hojas de maíz.....	46
5.2.2 Reflectancia de hojas de aguacate.....	48
5.2.3 Reflectancia de hojas de granada.....	50
5.2.4 Reflectancia de hojas de laurel de la India.....	52
5.3 Comparación con el método de cámara de presión Scholander.....	54
<b>6.- CONCLUSIONES.....</b>	<b>57</b>
<b>7.- BIBLIOGRAFIA</b>	<b>58</b>





## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura. 1.1</b> Partes de la planta y esquema que muestra la disposición general de la estructura de una hoja.....	13
<b>Figura. 1.2</b> Efectos termoeléctricos utilizados en psicrometría termopar. a) Efecto Seebeck, la corriente fluye debido a la diferencia de temperatura entre las salidas A y B, b) Medición de la diferencia de temperatura entre A y B. B puede inicialmente ser enfriado por el efecto Peltier, c) Manteniendo la unión permanentemente húmedo en el B.....	15
<b>Figura. 1.3</b> Sistema termopar Peltier para medir el potencial hídrico que consiste en: a) un micro voltímetro, una unidad de control y el psicrómetro termopar; b) unión de censado se ilustra en detalle.....	15
<b>Figura. 1.4</b> Termopar para tomar determinaciones isopiésticas. La cámara psicrométrica y el barril son de latón y se sumergen en un baño de agua a temperatura constante. <i>Clave para símbolos:</i> barril, A; tubo de plexiglás, B; disipador de calor émbolo, P; representación esquemática del anillo sellado (recubierto con grasa llave de paso) para la cámara y el sello de grasa para llave de paso para émbolo, S; termopar con unión de anillo, T.....	18
<b>Figura 1.5</b> Izquierda, silueta del termopar tipo Spanner; derecha, silueta del psicómetro Richards-y-Ogata-. Símbolos: a, latón montaje; b, sello O-anillo, c, doble núcleo, PVC cubierto de cobre flexible, al descubierto en esta región; d, unión de referencia; e, unión libre; f, cromel-P 0,001 pulgadas (0,0254 mm) de diámetro; g, constantan 0,001 pulgadas (0,0254 mm) de diámetro; h, cilindro de plata.....	19
<b>Figura 1.6</b> Vista en sección transversal del higrómetro. A, cavidad; B, termopar, C, postes de soporte para el termopar; D, placa frontal; E, sección de cavidad contenedora; F, placa base.....	20
<b>Figura 1.7</b> Cámara de presión de Scholander.....	21
<b>Figura 1.8</b> Prensa hidráulica para medir potencial hídrico de plantas. La presión hidráulica es usada para empujar una membrana flexible y presionar la hoja contra la ventana de plexiglass. Tanto la presión es aplicada, el agua aparecerá del tallo, o del borde de la hoja.....	21
<b>Figura 2.1.</b> Propiedad de una onda de radiación electromagnética.....	22
<b>Figura 2.2.</b> Características del espectro electromagnético indicando sus principales zonas en función de la longitud de onda.....	22
<b>Figura 2.3.</b> Interacción de la energía y materia.....	24
<b>Figura 2.4.</b> Firma espectral de la vegetación.....	25

<b>Figura 2.5.</b> Patrones de reflectancia a) Hoja verde sana; b) Hoja con daño incipiente; c) Hoja amarillenta; d) Muerte de tejido.....	27
<b>Figura 3.1.</b> Infrarrojo medio se subdivide en: onda corta, onda media y onda larga....	29
<b>Figura 3.2.</b> Emisión, reflexión y transmisión de un objeto.....	30
<b>Figura 3.3.</b> Sistema de medición termografico a reflexión.....	31
<b>Figura 3.4.</b> Reflector Lambertiano.....	32
<b>Figura 3.5.</b> Comportamiento espectral de una planta.....	33
<b>Figura 3.6.</b> Comportamiento espectral hoja verde sana.....	33
<b>Figura 4.1.</b> Etapas del proceso.....	36
<b>Figura4.2.</b> Instrumento radiador de IR consta de un cautín unido a una placa de aluminio.....	37
<b>Figura 4.3.</b> Soporte para fuente de IR.....	37
<b>Figura 4.4.</b> Se observa el soporte de la cámara sobresaliendo y el radiador de infrarrojo.....	38
<b>Figura 4.5</b> El arreglo consiste de la cámara termográfica con la cual se obtiene las imágenes para cuantificar la reflectividad.....	39
<b>Figura 4.6</b> Etapas de procedimiento experimental a) Sistema termográfico b) Pre calentamiento tiempo de encendido del emisor de IR c) Medición de muestra de especie vegetal ( $E_R$ ) d) Medición de emisión de la muestra vegetal ( $E_E$ ).Medición de emisión de la muestra vegetal ( $E_E$ ).....	40
<b>Figura 4.7</b> Superficie para evitar interferencias de reflectividad de otros objetos próximos.....	42
<b>Figura 4.8</b> Protocolo de medición de hojas de planta seguido.....	45
<b>Figura 5.1</b> Variaciones de reflectividad a medida que la hoja de maíz pierde humedad, comparaciones de reflectancia contra peso para las hojas de maíz.....	47
<b>Figura 5.2</b> Comparaciones de reflectancia contra peso para las hojas de aguacate.....	49
<b>Figura 5.3</b> Comparaciones de reflectancia contra peso para las hojas de granada.....	50
<b>Figura 5.4</b> Comparaciones de reflectancia de hojas adultas de laurel de la India.....	52

## INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Espectro electromagnético.....	23
Tabla 4.1 Variables que participan en la reflectividad medida.....	41
Tabla 4.2 Peso normal de una hoja en el momento de su recogida y peso posterior al secado con microondas.....	43
Tabla 5.1 Resultado del análisis de la variación de reflectancia de hojas de maíz.....	48
Tabla 5.2 Resultado del análisis de la variación de reflectancia de hojas de aguacate.....	50
Tabla 5.3 Resultado del análisis de la variación de reflectancia de hojas de aguacate.....	52
Tabla 5.4 Resultado del análisis de la variación de reflectancia de hojas de laurel de la India.....	54
Tabla 5.5 Comparación entre metodologías.....	55

# 1. INTRODUCCION A LOS INSTRUMENTOS DE MEDICION DE POTENCIAL HIDRICO

## 1.1 Agua en plantas

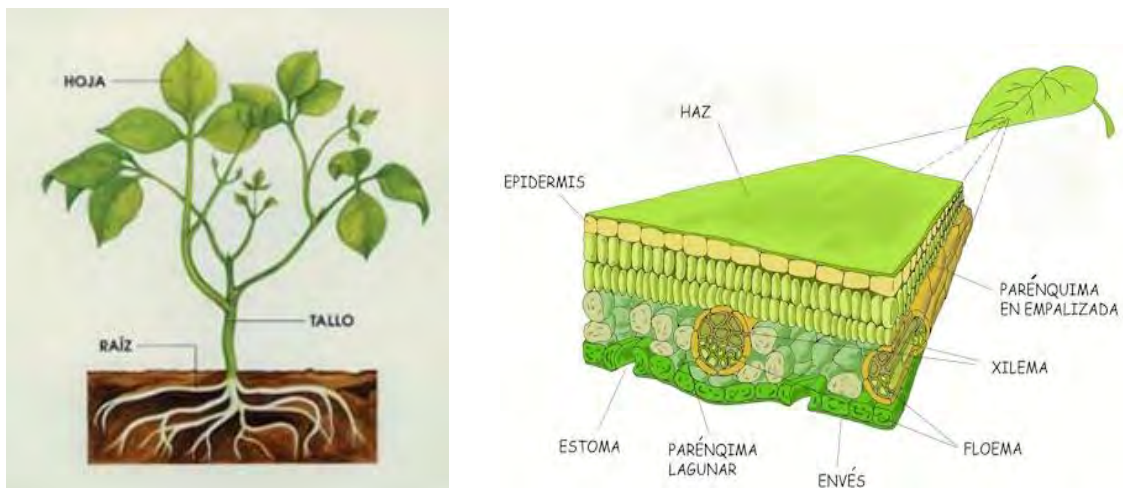
El agua es esencial para la vida vegetal. Para sobrevivir, las plantas necesitan agua, así como nutrientes, que son absorbidos por las raíces del suelo.

Dado que el agua es el factor más importante del suelo físico, afecta el crecimiento de la planta, su cuantificación es requerida para pronosticar el crecimiento de la planta y comprender los principios básicos de las relaciones planta-agua (Lincoln, 2006).

Así, es posible desarrollar sistemas para predecir por tanto, el crecimiento de las plantas, y como la cantidad de agua de que están formadas, y que es utilizada para mantener sus procesos vitales funcionando.

La cantidad de agua en un sistema (planta) es una medida del contenido hídrico. La absorción, el transporte y la pérdida de agua por evaporación y transpiración dan como resultado el **balance hídrico** (M. B, Kirkham, 2005). Vista la importancia de uso del agua, es fundamental emplear métodos adecuados en la evaluación del estado hídrico de la planta, y así poder conocer las necesidades de la misma.

Las partes fundamentales de una planta y la estructura interna de la hoja se muestran en la figura 1.1.



**Figura. 1.1** Partes de la planta y esquema que muestra la disposición general de la estructura de una hoja.

## 1.2 Potencial hídrico y el movimiento del agua

El concepto de potencial hídrico es de gran utilidad, puesto que permite predecir cómo se moverá el agua bajo diversas condiciones, ya que el agua se mueve de manera

espontánea en regiones que presentan diferencias de concentración hídrica (Curtis, 1997).

El agua en estado líquido es un fluido cuyas moléculas se encuentran en constante movimiento. La capacidad de las moléculas de agua para moverse en un sistema particular depende de su energía libre (Kramer, 1995). La magnitud más empleada para expresar y medir el estado de energía libre del agua es el potencial hídrico  $\Psi$ .

El potencial hídrico y su magnitud representan la capacidad de las moléculas de agua de moverse en un sistema, constituye la resultante de fuerzas de orígenes diversos (osmótico, capilar, de imbibición, turgente) que liga el agua al suelo o a los diferentes tejidos (Francisco Martin 2005, p. 103).

### **1.3 Metodologías de monitoreo de potencial hídrico en plantas**

Los métodos para determinar el potencial hídrico permiten medir la necesidad de agua de la planta. Cuyo objetivo es controlar el estrés de la misma, permitiendo ajustar tanto las dosis de riego, como los momentos de aplicación; logrando de esa manera hacer un uso más eficiente del agua, mejorando la respuesta de los cultivos, ahorrando agua y por ende la rentabilidad y la sustentabilidad ambiental de las prácticas de riego (García, 2008).

### **1.4 Instrumentos de medición potencial hídrico psicómetro termopar**

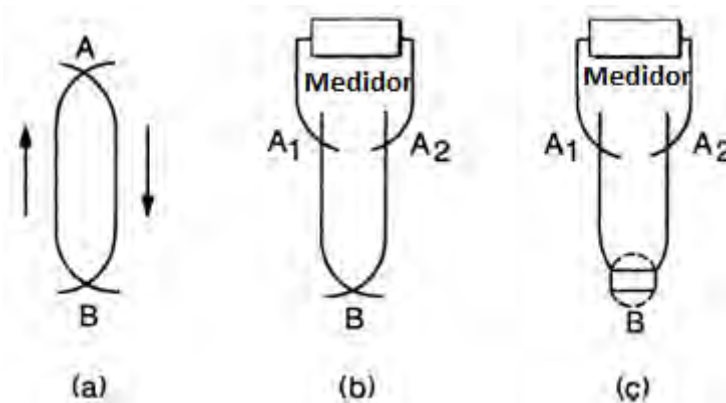
La determinación del potencial hídrico, se realiza con el uso de métodos diversos como psicómetros termopares (thermocouple psychrometers TCPs), cuyo uso se ha extendido a aplicaciones. A aplicaciones en el ámbito de la agronomía en muestras vegetales, suelos y fruto, siendo los TCPs una herramienta valiosa en las investigaciones referentes al sistema agua-planta-suelo (Martínez, p. 161).

Los psicómetros termopar son instrumentos que permiten determinar el estado energético del agua en tejidos de plantas y animales, y otros medios que contengan agua, su utilización abarca tanto las lecturas basadas en técnicas psicométricas (disminución de la temperatura del bulbo húmedo “wet-bulb temperatura depresión”), higrométricas (disminución de la temperatura de condensación “dew-point temperatura depresión”), así como la isopiética. (Martínez, p. 164). La manera de funcionar de estos dispositivos aprovecha el efecto termoeléctrico.

### **1.5 Efecto termoeléctrico**

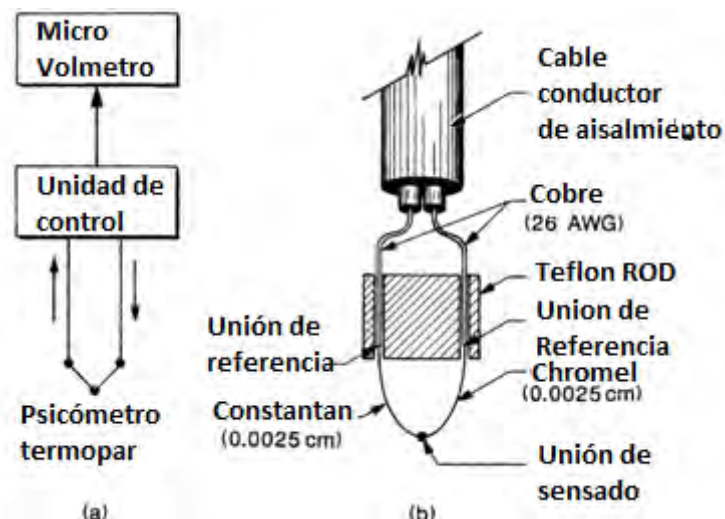
El poder termoeléctrico que es la conversión directa de la diferencia de temperatura a voltaje eléctrico, es un término asociado a los termopares, y que está asociado a efectos

como el Seebeck y el Peltier. La Figura 1.2 a) muestra que un circuito formado por dos materiales (a y b), que se encuentran a diferente temperatura, producen un flujo de corriente que pasa a través de ellos, este es el efecto Seebeck (Barrs, 1968, p. 287). En la figura 1.2 b) se muestra que si ambas uniones están inicialmente a la misma temperatura, entonces, y si se hace pasar un flujo de corriente a través de ellas, una unión se enfriara y otra se calentara (Barrs, 1968, p. 287), este es el efecto Peltier, las razones de calor generado y absorción son proporcionales a la corriente. Si la corriente se invierte los roles de las uniones también cambian.



**Figura. 1.2** Efectos termoeléctricos utilizados en psicrometría termopar. a) Efecto Seebeck, la corriente fluye debido a la diferencia de temperatura entre las salidas A y B, b) Medición de la diferencia de temperatura entre A y B. B puede inicialmente ser enfriado por el Efecto Peltier, c) Manteniendo la unión permanentemente húmedo en el B (Richards and Ogata psicrómetro termopar).

Un termopar consta de dos alambres de distinto material, unidos por uno de sus extremos opuesto. Dichos termopares, se localizan en la cabeza de detección del psicómetro termopar, la cual suele estar protegida por una cubierta denominada cápsula como se muestra en la Figura 1.3 a).



**Figura. 1.3** Sistema termopar Peltier para medir el potencial hídrico que consiste en: a) un micro voltímetro, una unidad de control, y el psicómetro termopar; b) unión de censado se ilustra en detalle (Richards and Ogata psicómetro).

En la Figura 1.3 a) se aprecian las partes que componen un sistema termopar, formado por una unidad de control, que contiene una fuente para causar una diferencia de potencial, y un medidor micro voltímetro, donde el rango de medidas es de  $\mu\text{V}$ .

### 1.5.1 Poder termoeléctrico

Si dos alambres conductores A y B formados por distintos materiales se unen, y si se hace pasar por ellos una corriente, puede inducirse otra transferencia de calor. Este calor, llamado calentamiento Peltier, se debe a fenómenos termoeléctricos, y es el calor que emana de la junta o empalme (Kurt C, p 599).

Donde el coeficiente Seebeck de un circuito formado por dos elementos, es la diferencia de coeficientes individuales de cada uno.

### 1.6 Relación entre humedad relativa y potencial de Agua

Los psicómetros termopar miden el potencial del agua en los tejidos vegetales basándose en la ecuación de Kelvin (ver ecuación 1.1). Para cualquier humedad atmosférica, se puede calcular el potencial de agua en el suelo (o cualquier superficie) en equilibrio con esta humedad, este es el principio de medida del psicómetro. La relación entre el potencial hídrico  $\Psi$  y la humedad relativa  $h$  queda expresada de la siguiente forma (Francisco Martin 2005, p. 62).

$$\Psi = \left(\frac{RT}{M}\right) \ln (h) \quad 1.1$$

Donde  $\Psi$  = potencial de agua,  $R$  = constante de los gases ideales,  $T$  = temperatura absoluta ( $^{\circ}\text{K}$ ),  $M$  = volumen molar de agua pura,  $e$  = presión parcial del vapor de agua en el aire,  $e^{\circ}$  = presión de vapor saturado, y  $e / e^{\circ} = h$  (humedad relativa).

La humedad se calcula a partir de medidas de temperatura, para potenciales en el intervalo de agua disponible en plantas, las pequeñas variaciones de humedad relativa se determinan con pequeñas variaciones de temperatura.

#### 1.6.1 Relación entre presión de vapor y temperatura

Se obtiene el potencial de agua por observación de la presión de vapor. La relación entre presión de vapor y temperatura es:

$$e = e^{\circ} - g (T_A - T_w) \quad 1.2$$



Donde  $e$  = presión parcial del vapor de agua en el aire;  $e_w^\circ$  = presión de vapor saturado a la temperatura de bulbo húmedo;  $T_A$  = temperatura de bulbo seco (temperatura del aire);  $T_W$  = temperatura de bulbo húmedo;  $g$  = constante psicométrica (M.B, Kirkham, 2005, p 246).

Los psicómetros están formados por dos termómetros, uno que mide la temperatura ambiente y otro la temperatura de una fuente de agua en evaporación.

### 1.7 Calentamiento Joule

Los cambios de temperatura asociados con el efecto Peltier están relacionados con el trabajo  $W$  realizado, en la transferencia de una carga  $q$  entre dos terminales de un circuito que tienen una diferencia de potencial  $V$  de la siguiente manera: (M.B, Kirkham, 2005, p 244).

$$W = qV(V) = IVt \quad 1.3$$

Donde:  $I$  es la corriente que circula y  $V = IR$ , donde  $R$  es la resistencia,

$$IVt = I(IR)t = I^2Rt \quad 1.4$$

Entonces la energía eléctrica convertida en calor por un conductor de resistencia  $R$  por el que circula una corriente  $I$  es:

$$W = I^2Rt \quad 1.5$$

Lo cual es conocido como la ley de calentamiento Joule (Schaum, 1961, p. 153). Considerando 1 Joule = 0.239 calorías

$$H = 0.239I^2Rt. \quad 1.6$$

El valor de un termopar, cuando se usa como un termómetro (medición de diferencia de temperatura entre dos uniones), depende de la fuerza electromotriz (fem) neta desarrollada, que está directamente relacionada con la diferencia de temperatura entre las uniones. Para pequeñas diferencias de temperatura, es aproximadamente proporcional a la diferencia de temperatura (Shortley y Williams, 1971, p. 578).

### 1.8 Importancia de condiciones isotérmicas al hacer las mediciones

Las mediciones de potencial hídrico en plantas, deben realizarse bajo condiciones isotérmicas, se señalan cuatro formas en las que la temperatura afecta a las mediciones (Kirkham. M.B. 2005, p 248).

1.-A través de la relación entre el potencial de agua y la humedad relativa (Ecuación 1.1).

2.- A través de la dependencia de la temperatura de la relación entre bulbo-húmedo, la depresión y la presión de vapor (Ecuación 1.6).

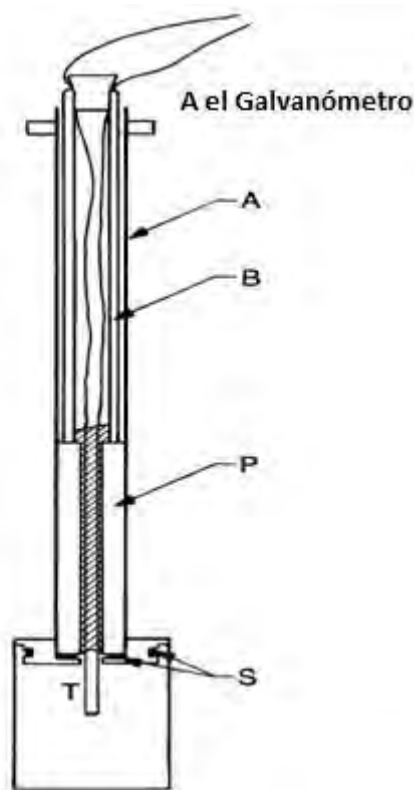
3.-A través de las diferencias de temperatura entre la unión de detección del termopar y la muestra (que surge, por ejemplo, de la respiración por el tejido).

4.-A través de los cambios de temperatura dentro de la cavidad formada por el psicrómetro termopar y de la muestra, lo cual alterará la humedad relativa del aire en la cavidad, si el vapor de agua no puede ser intercambiado con el circundante sistema.

### 1.9 Tipos de psicómetros termopar

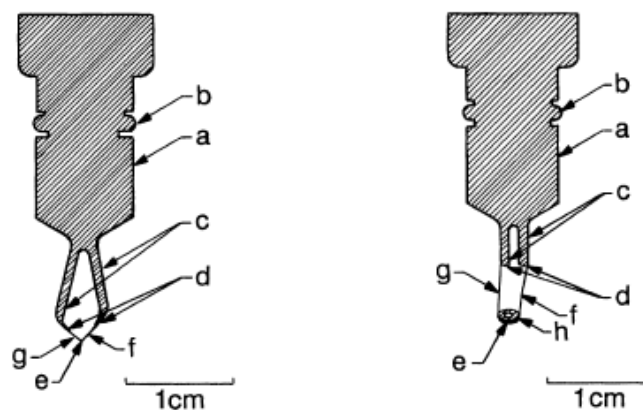
Son cuatro los tipos de instrumentos con termopar usados para medir potencial hídrico de plantas:

1.- Isopiéstico (Figura 1.4): en el que las soluciones de concentraciones variables se colocan manualmente en la unión húmeda del psicrómetro termopar. Una solución isopiéstica es la solución que tiene la misma presión de vapor que la del tejido y no produce ninguna salida de termopar (el "punto cero"), (M. B, Kirkham, pag. 249).



**Figura. 1.4** Termopar para tomar determinaciones isopiésticas. La cámara psicométrica y el barril son de latón y se sumergen en un baño de agua a temperatura constante. *Clave para símbolos:* barril, A; tubo de plexiglás, B; dissipador de calor émbolo, P; representación esquemática del anillo sellado (recubierto con grasa llave de paso) para la cámara y el sello de grasa para llave de paso para émbolo, S; termopar con unión de anillo, T. (Boyer, J.S, R.W. Brown and B.P. pp. 51–55). Galvanómetro

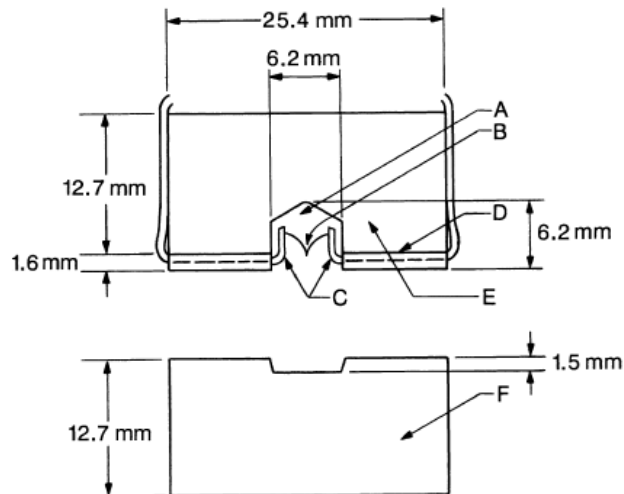
2.-Peltier (Figura 1.5, izquierda): en él la unión húmeda se enfría, usando el efecto Peltier, a la temperatura del punto de rocío. La unión entonces se eleva rápidamente a la temperatura de bulbo húmedo. Este psicrómetro también es llamado Spanner, el grado de enfriamiento es una función del potencial de agua del tejido (M. B, Kirkham, pag. 249).



**Figura 1.5** Izquierda, silueta del termopar tipo Spanner; derecha, silueta del psicrómetro Richards-y-Ogata-. Símbolos: a, latón montaje; b, sello O-anillo, c, doble núcleo, PVC cubierto de cobre flexible, al descubierto en esta región; d, unión de referencia; e, unión libre; f, cromel-P 0,001 pulgadas (0,0254 mm) de diámetro; g, constantan 0,001 pulgadas (0,0254 mm) de diámetro; h, cilindro de plata (Barrs, HD, T.T. Kozlowski, 1968 pp. 235–368).

3.- El psicrómetro termopar en el que se pone una gota de agua a mano en la unión húmeda (Figura. 1.5, derecha), en lugar de tener una corriente de enfriamiento formando una gota de agua, como es hecho con el Peltier. Este instrumento se conoce como Richards-Ogata o simplemente el psicrómetro Richards. Al igual que con el psicrómetro Spanner, el grado de enfriamiento es función del potencial de agua del tejido (Kirkham. M. B, pag. 249).

4.- En el higrómetro de punto de rocío (Figura. 1.6), la unión húmeda se enfría a la del punto de rocío y se queda en ese punto durante la medición. Este método utiliza el efecto Peltier para enfriar la unión húmeda, pero difiere de la psicrómetro Peltier termopar en que se detecta la depresión del punto de rocío en lugar de la de bulbo húmedo depresión (M. B, Kirkham, pag. 249).



**Figura 1.6** Vista en sección transversal del higrómetro. A, cavidad; B, termopar, C, postes de soporte para el termopar; D, placa frontal; E, sección de cavidad contenedora; F, placa base. (Neumann, H.H., and G.W. Thurtell, R.W. Brown and B.P. van Haveren, 1972, pp. 103–112).

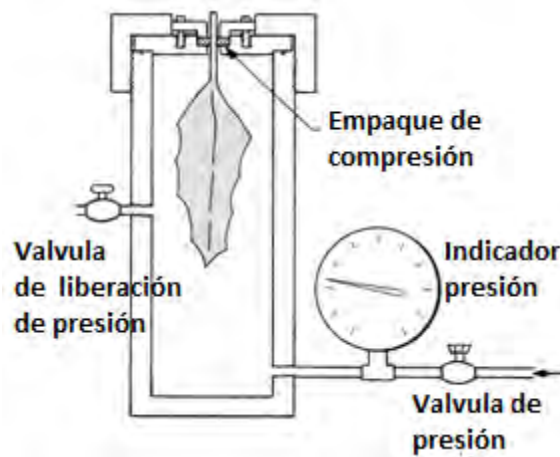
La técnica del punto de rocío es similar al procedimiento isopiéstico. Ambos métodos ajustan la presión de vapor de la gota de agua en el cruce húmedo hasta que esté en equilibrio con el vapor dentro de la cámara. En la técnica de isopiéstico, la presión de vapor de la gotita es ajustada cambiando el potencial osmótico. Con el higrómetro de punto de rocío, la presión de vapor se regula mediante el control de la temperatura de la gota (M. B, Kirkham, pag. 252).

## 1.10 Medición de Potencial Hídrico con Cámaras de Presión

### 1.10.1 Cámara de Scholander

La cámara de presión es otro método utilizado para medir el potencial hídrico de plantas. Partiendo del hecho que el agua se mueve en el interior de la planta a través de pequeñas células interconectadas que en conjunto forman el xilema, y la presión en su interior corresponde a una tensión negativa producto de la evaporación de las hojas.

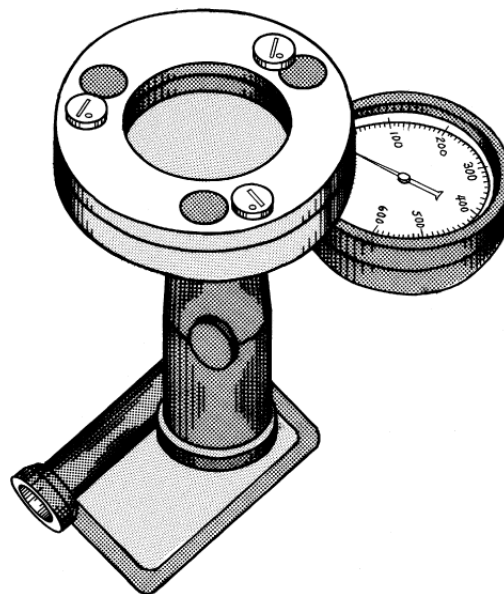
El método consiste en aumentar la presión alrededor de un rodaje de hoja hasta que la savia desde el xilema aparece en el extremo cortado, se extiende fuera de la cámara y se expone a la presión atmosférica (Figura. 1.7). Entonces la presión interna de la cámara es aumentada con nitrógeno y así provocar la salida de savia por los vasos de conducción xilema y aparezca en forma de gota, en este momento la presión es igual a la tensión para forzar el agua fuera de la células, entonces se obtiene la lectura del manómetro que es una función del potencial hídrico de la planta.



**Figura 1.7** Cámara de presión de Scholander. (Kramer, P.J. 1983).

### 1.10.2 Prensa hidráulica

La prensa hidráulica opera con el mismo principio que la cámara de presión y consiste de un gato hidráulico comercial, donde se aplica presión a través de una membrana de goma sobre una muestra de hoja, la cual es observada a través de una ventana de plexiglass (Figura 1.8). Cuando la presión aplicada iguala al potencial de agua, las paredes celulares e intercelulares se saturan (M. B. Kirkham, pag. 271).

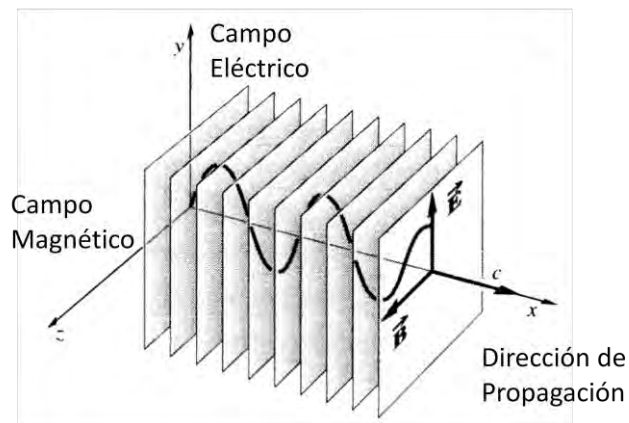


**Figura 1.8** Prensa hidráulica para medir potencial hídrico de plantas. La presión hidráulica es usada para empujar una membrana flexible y presionar la hoja contra la ventana de plexiglass. Tanto la presión es aplicada, el agua aparecerá del tallo, o del borde de la hoja (Campbell Scientific, Logan).

## 2. PRINCIPIOS BASICOS DE RADIACION

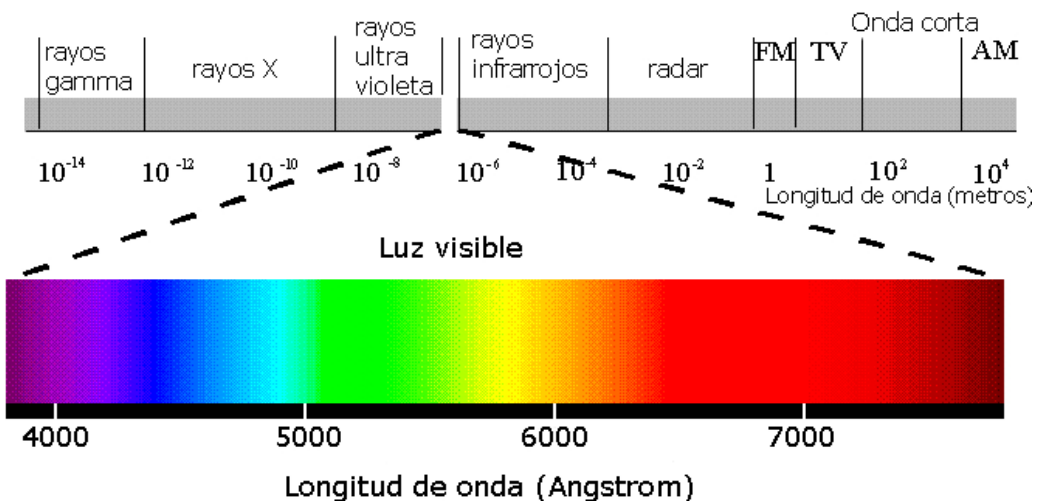
### 2.1 Espectro electromagnético

Las radiaciones electromagnéticas son una forma de energía que se propaga por el espacio en forma ondas a velocidades muy altas. En el espacio libre, la onda electromagnética es transversal (Hecht, 2002). De manera esquemática la radiación electromagnética se puede representar como oscilaciones sinusoidales perpendiculares de campos magnéticos y eléctricos (figura2.1).



**Figura 2.1.** Propiedad de una onda de radiación electromagnética que se propaga en el vacío o en un medio homogéneo e isotrópico (Hetch, 2002).

Estas radiaciones electromagnéticas pueden ordenarse en un espectro que se extiende desde ondas de frecuencias muy elevadas (longitudes de onda pequeñas) como los rayos gamma y X, hasta frecuencias muy bajas de ondas grandes como las microondas y parte del espectro infrarrojo. Por orden creciente de longitud de onda el espectro electromagnético (Figura2.2), está compuesto por rayos gamma, rayos X, radiación ultravioleta, luz visible, rayos infrarrojos, microondas y ondas de radio.



**Figura 2.2.** Características del espectro electromagnético indicando sus principales zonas en función de la longitud de onda.

Al considerar el movimiento mediante el cual se efectúa el proceso de transmisión de energía es útil tratarlo como un fenómeno ondulatorio (Mosqueira, 1971). Por lo que de la ley de Planck es una alternativa viable para el análisis y se expresa como sigue:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad 2.1$$

Donde h es la constante de Planck ( $6.63 \times 10^{-34}$  J s),  $\nu$  es la frecuencia, c la velocidad de la luz en el vacío y  $\lambda$  la longitud de onda.

### 2.1.1 Tipos de energía electromagnética

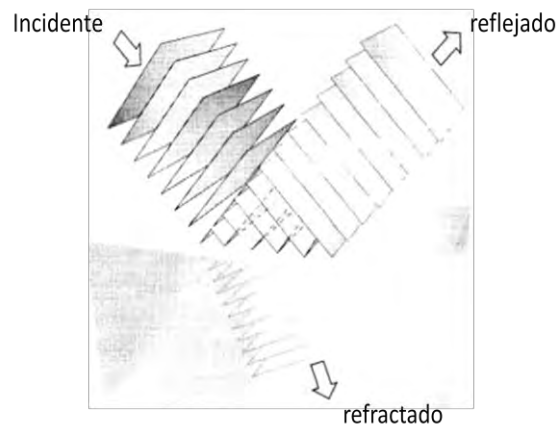
No todas las ondas electromagnéticas tienen el mismo comportamiento en el medio de propagación, la misma procedencia o la misma forma de interacción con la materia. Por ello, el espectro electromagnético se divide convencionalmente en segmentos o bandas de frecuencia (Tabla 2.1). Existen diferentes aspectos a considerar para establecer diferentes clasificaciones y su utilización para distintos propósitos, que van desde aplicaciones industriales, medicas, científicas o domésticas.

Tabla 2.1 **Espectro electromagnético.**

Banda	Longitud de onda (m)	Frecuencia (Hz)	Energía (J)
Rayos gamma	$< 10 \times 10^{-12}$ m	$> 30,0 \times 10^{18}$ Hz	$> 20 \cdot 10^{-15}$ J
Rayos X	$< 10 \times 10^{-9}$ m	$> 30,0 \times 10^{15}$ Hz	$> 20 \cdot 10^{-18}$ J
Ultravioleta extremo	$< 200 \times 10^{-9}$ m	$> 1,5 \times 10^{15}$ Hz	$> 993 \cdot 10^{-21}$ J
Ultravioleta cercano	$< 380 \times 10^{-9}$ m	$> 7,89 \times 10^{14}$ Hz	$> 523 \cdot 10^{-21}$ J
Luz Visible	$< 780 \times 10^{-9}$ m	$> 384 \times 10^{12}$ Hz	$> 255 \cdot 10^{-21}$ J
Infrarrojo cercano	$< 2,5 \times 10^{-6}$ m	$> 120 \times 10^{12}$ Hz	$> 79 \cdot 10^{-21}$ J
Infrarrojo medio	$< 50 \times 10^{-6}$ m	$> 6,00 \times 10^{12}$ Hz	$> 4 \cdot 10^{-21}$ J
Infrarrojo lejano/submilimétrico	$< 1 \times 10^{-3}$ m	$> 300 \times 10^9$ Hz	$> 200 \cdot 10^{-24}$ J
Microondas	$< 10^{-2}$ m	$> 3 \times 10^8$ Hz <sup>n.1</sup>	$> 2 \cdot 10^{-24}$ J
Ultra Alta Frecuencia - Radio	$< 1$ m	$> 300 \times 10^6$ Hz	$> 19.8 \cdot 10^{-26}$ J
Muy Alta Frecuencia - Radio	$< 10$ m	$> 30 \times 10^6$ Hz	$> 19.8 \cdot 10^{-28}$ J
Onda Corta - Radio	$< 180$ m	$> 1,7 \times 10^6$ Hz	$> 11.22 \cdot 10^{-28}$ J
Onda Media - Radio	$< 650$ m	$> 650 \times 10^3$ Hz	$> 42.9 \cdot 10^{-29}$ J
Onda Larga - Radio	$< 10 \times 10^3$ m	$> 30 \times 10^3$ Hz	$> 19.8 \cdot 10^{-30}$ J
Muy Baja Frecuencia - Radio	$> 10 \times 10^3$ m	$< 30 \times 10^3$ Hz	$< 19.8 \cdot 10^{-30}$ J

## 2.2 Interacción de la radiación y la materia

Cuando las radiaciones electromagnéticas inciden sobre una superficie se presentan tres fenómenos: reflexión, transmisión y absorción, estas formas de onda se relacionan de la siguiente manera (Figura 2.3).



**Figura 2.3.** Interacción de la energía y materia (Hetcht, 2002).

Así, la luz que incide sobre un material  $E_I$  puede transmitirse  $E_T$ , reflejarse  $E_R$  y/o absorberse  $E_A$ :

$$E_I = E_R + E_A + E_T \quad 2.2$$

Donde  $E_I$  denota la energía incidente,  $E_R$  la energía reflejada,  $E_A$  la energía absorbida y  $E_T$  la energía transmitida, de manera que un material puede caracterizarse por su **transmitancia** ( $E_T/E_I$ ), **absorbancia** ( $E_A/E_I$ ) y **reflectancia** ( $E_R/E_I$ ).

Todo objeto en la naturaleza posee una distribución única de radiación reflejada, transmitida y absorbida. Estas características espectrales pueden ser usadas para distinguir un objeto de otro o para obtener información acerca de la forma, tamaño y otras propiedades físicas y químicas (Soria, 1990).

Las propiedades de cada material producen una distribución característica de la reflectancia en diferentes longitudes de onda, generando un patrón conocido como firma espectral, que son afectadas por las características del objeto que originan su interacción con la energía electromagnética.

Por tal motivo resulta conveniente expresar los fenómenos de interacción de los materiales con la energía radiante por medio de la reflectancia, porción de la energía incidente que es reflejada.

$$\rho = \frac{E_r}{E_i} \quad 2.3$$



Donde  $\rho$  es la reflectancia de la energía expresada en porcentaje,  $E_r$  es la energía de la longitud de onda reflejada por el objeto y  $E_i$  es la energía incidente.

### 2.3 Propiedad espectral de las plantas

En la vegetación el nivel de reflectancia se ve modificado principalmente por factores como: los tipos de pigmentos, estructura de las hojas y el contenido de humedad. El comportamiento típico de la vegetación muestra una reducida reflectancia en las bandas del visible, con un máximo relativo en la porción verde (Figura 2.4). La absorción de la luz por los pigmentos de la hoja, principalmente clorofila, xanofila y caroteno, son los responsables de la baja reflectancia (Carolis y Amodeo, 1980).

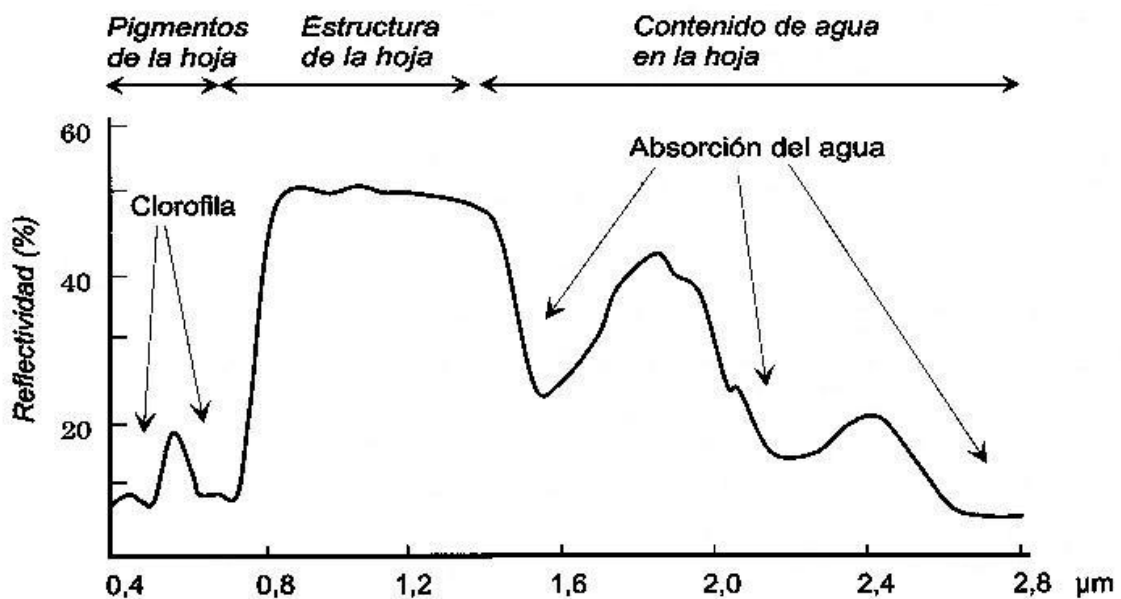


Figura 2.4. Firma espectral de la vegetación (Soria, 1998).

El estudio de la firma espectral de una masa de hojas permite extraer algunas conclusiones (Ormeño, 1991):

1. En el intervalo visible-infrarrojo medio, las hojas presentan tres zonas diferenciadas: una en el visible (0,4-0,7  $\mu\text{m}$ ) caracterizada por su baja reflectancia, otra en el infrarrojo próximo (0,7-1,3  $\mu\text{m}$ ) y otra en el infrarrojo medio (1,3-2,5  $\mu\text{m}$ ).
2. En el visible, la reflectancia de las hojas no supera el 15 % y la transmitancia es también pequeña. Esto es debido a que los pigmentos fotosintéticos tienen fuertes bandas de absorción en este intervalo espectral. Entre ellos, las clorofilas a y b, que son las más absorbentes con un 65 % del total, presentan dos bandas de absorción centradas en el azul y en el rojo, por lo que producen un máximo relativo en la signatura espectral en torno a 0,55 micras, responsable del color verde de las hojas.

3. En el infrarrojo próximo las hojas presentan una meseta de alta reflectancia (alrededor del 50 %). De la energía restante, la mayor parte es transmitida, ya que la absorbancia es sólo del 10 %, por lo que puede considerarse prácticamente transparente en esta región del espectro. Además hay que considerar que la energía transmitida podrá ser interceptada por otra hoja, será reflejada con mayor probabilidad y así sucesivamente.

4. En el infrarrojo medio, el agua marca su presencia en las hojas produciendo tres fuertes bandas de absorción en la signatura resultante, al igual que ocurre con los suelos: 1,4; 1,9 y 2,5 micras.

## **2.4 Reflectancia de plantas bajo condiciones de estrés**

La cubierta vegetal es un medio heterogéneo compuesto de hojas, tallos, troncos, suelos, agua, todos estos elementos presentan sus respuestas espectrales respectivas. Además, hay que tener en consideración que las plantas son seres vivos sujetos a cambios estacionales, climáticos e incluso a enfermedades y que estos cambios afectan a su reflectividad.

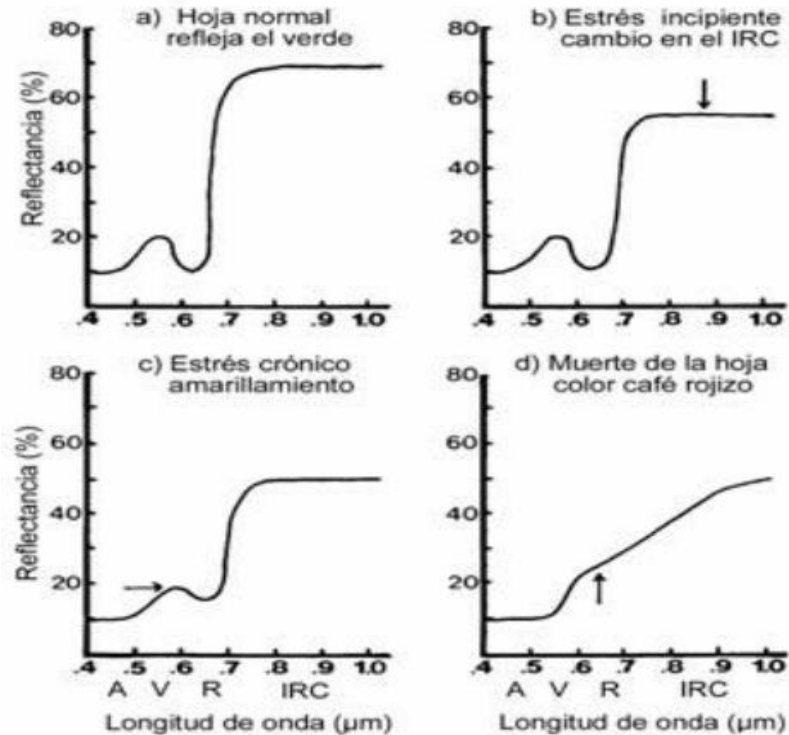
Como consecuencia de la reducción del contenido hídrico, la planta experimenta cambios en su fisiología. El estrés hídrico afecta a la mayor parte de sus funciones vitales, de forma que no hay, prácticamente, ningún proceso fisiológico que no esté afectado.

Ahora, se tiene un patrón de curva de reflectancia para cultivos bajo condiciones óptimas (Figura 2.5) y bajo condiciones de estrés fisiológicos que muestra cómo cambia este patrón (Figuras 2.5 b, c y d).

Una planta que se encuentra en condiciones de estrés presenta ciertos cambios en su firma espectral. Los cambios en la reflectancia espectral ocurren en la región del infrarrojo cercano y después en el visible. Estas alteraciones son llamadas previsuales e implican que los cambios en el infrarrojo son seguidos por cambios en la región visible.

Después de la aparición de los síntomas previsuales en el infrarrojo, si las plantas continúan bajo condiciones de estrés, es probable que se afecten los constituyentes internos celulares (por ejemplo membranas, organelos o pigmentos) de la pared celular o el espacio de aire interface (Murtha, 1982). Una característica típica de estas condiciones es la pérdida o deterioro de los cloroplastos, lo que provoca un cambio en las bandas verde y rojo de la reflectividad visual observándose entonces un color amarillento (Figura 2.5 c).

Sin embargo, de continuar las condiciones de estrés el cambio final generalizado es el enrojecimiento del follaje. Este cambio es descrito como una disminución de la reflectancia en el infrarrojo cercano o como un incremento en la reflectancia del rojo (figura 2.5 d).



**Figura 2.5.** Patrones de reflectancia a) Hoja verde sana; b) Hoja con daño incipiente; c) Hoja amarillenta; d) Muerte de tejido (Murtha, 1982).

## 2.5 Factores que afectan la reflectancia de hojas

Existen numerosos factores que, si bien no modifican sustancialmente la reflectancia espectral del material vegetal, sí condicionan en cierta medida sus peculiaridades. Uno de ellos es la orientación relativa de la superficie vegetal con respecto a la luz incidente, la cual depende de variables como:

- La vegetación tiene un comportamiento dinámico debido a los cambios fenológicos que ocurren estacionalmente. Esto significa que su firma espectral cambia durante el año.

- Las condiciones de iluminación asociadas a la topografía (pendiente y orientación), la posición del sol durante el año (elevación y acimut), y las condiciones de humedad del suelo y la vegetación pueden significar variaciones importantes en el patrón de respuesta espectral.

En este caso las plantas están sujetas a constantes variaciones ambientales, ya sea por cambios en las condiciones meteorológicas, fenológicas, edafológicas, o biológicas, causando variaciones en la reflectividad de las plantas, especialmente en las hojas.

### **2.5.1 Absorción de los pigmentos**

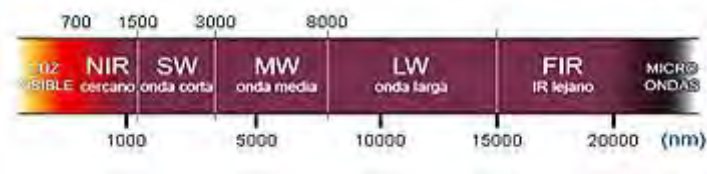
La interacción de la radiación solar con las moléculas foliares de las plantas controlan las reflectancias del espectro visible (VIS) y del infrarrojo (IR). Los componentes bioquímicos (pigmentos, proteínas, carbohidratos aceites, agua), morfología de la hoja (mesófilo) y arquitectura de la planta, influyen en la tendencia de las plantas para absorber, transmitir y reflejar la radiación solar de distintas longitudes de onda corta de 280 a 2800 nm (Curran *et al.*, 2001).

### 3. MEDICION RADIOMETRICA TERMOGRAFIA

#### 3.1 Teoría de la termografía

Todos los materiales que están a una temperatura por encima del cero absoluto (0 K, -273°C) emiten energía infrarroja.

Una cámara termográfica sensa la onda larga de la radiación infrarroja recibida en su campo de visión, a partir de la cual calcula la temperatura (T) del objeto a medir (Figura 3.1). El cálculo tiene en cuenta la emisividad ( $\epsilon$ ) de la superficie del objeto medido así como la compensación de la temperatura reflejada; estas dos variables se pueden ajustar manualmente en las cámaras termográficas (Testo AG, 2008).



**Figura 3.1.** Infrarrojo medio se subdivide en: onda corta, onda media y onda larga.

#### 3.2 Medición radiométrica

La radiometría de campo, se puede definir como la medida de la reflectividad espectral (relación entre el flujo incidente y el reflejado) de cualquier superficie en su entorno natural, llevando a cabo implícito el estudio de las interrelaciones entre las características espectrales de la misma y sus atributos biofísicos (Milton, 1995).

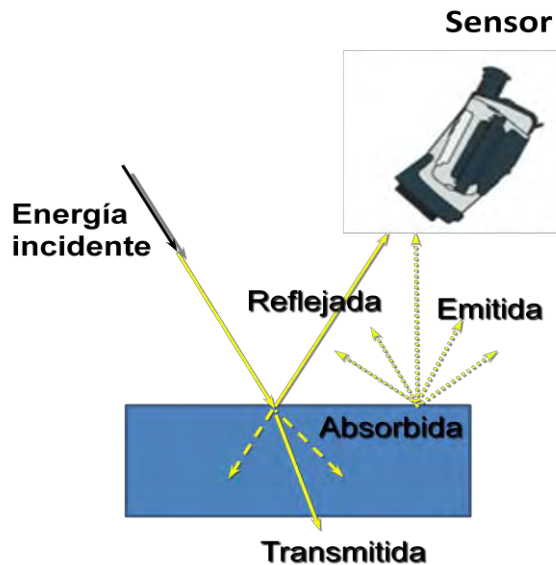
#### 3.3 Emisión, reflexión y transmisión en termografía

La radiación registrada por la cámara termográfica consiste en la radiación de onda larga emitida, reflejada y transmitida que surge de los objetos presentes en el campo de visión de la cámara figura3.2.

**Emisividad** -Es la medida de la capacidad de un material de emitir (propagar) radiación infrarroja, y es un factor de comparación entre un cuerpo negro perfecto, que por definición es el objeto que emite la mayor cantidad de energía posible en un determinado rango de longitudes de onda y a una temperatura dada, y un cuerpo bajo estudio a la misma temperatura, por definición es la razón entre la energía emitida por el objeto bajo estudio y la energía emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura.

**Reflexión** -La reflexión es la medida de la capacidad de un objeto de reflejar la radiación que incide sobre él, está puede ser especular o difusa.

**Transmisión** -La transmisión es la medida de la capacidad de un material de transmitir (permitir el paso) de la radiación incidente sobre él.



**Figura 3.2.** Emisión, reflexión y transmisión de un objeto.

### 3.4 Detectores infrarrojos

Los sensores infrarrojos son los instrumentos utilizados para captar la radiación electromagnética proveniente del rango del espectro infrarrojo. Normalmente constan de cuatro componentes: los colectores, los detectores, los procesadores de señales y las unidades registradoras y hay varias formas de clasificarlos (Geoffrey J. M., James M. K, 1992):

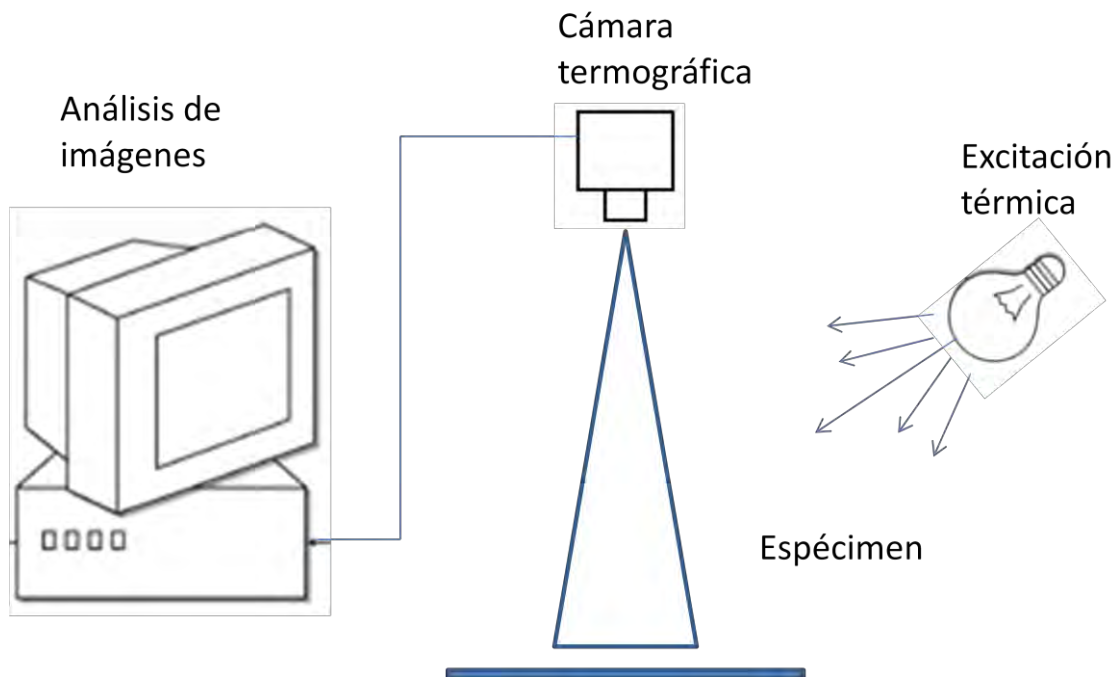
- Sistemas de encuadre, que comprenden varios tipos de cámaras fotográficas que registran instantáneamente una imagen completa.
- Sistemas de rastreo, que tienen un detector (sensor electrónico) que barre una superficie en una serie de líneas paralelas recogiendo datos para registrar una imagen. Pueden utilizar sensores pasivos, que registran la radiación electromagnética reflejada o emitida por fuentes naturales, o sensores activos, que iluminan el objeto con su propia fuente de radiación y luego registran la reflexión.

### 3.5 La cámara instrumento de medición

Las cámaras termográficas detectan la radiación infrarroja que emiten los objetos y la transforman en una imagen dentro del espectro visible en la que la escala de colores (o grises) representa las distintas intensidades de la radiación captada figura3.3.

La intensidad de la radiación infrarroja es función de la temperatura pero no sólo de ella, ya que influyen también las características superficiales del objeto, como la rugosidad, la emisividad que vendría siendo análogo al color en el visible y por supuesto el tipo de material (Amperis Products).

Las cámaras termográficas arrojan un valor de temperatura para cada punto, hay que tener en cuenta que, para la misma temperatura, dos materiales pueden irradiar energía infrarroja con intensidades diferentes, en función de su emisividad, que es la medición de la capacidad de un objeto para emitir energía infrarroja.



**Figura 3.3.** Sistema de medición termográfico a reflexión.

### 3.6 Termografía activa

La termografía puede ser llamada activa cuando se produce una estimulación del sistema observado, con el objetivo de identificar parámetros del mismo a través de un análisis comparativo de los estados antes y después de la estimulación.

Hay una gran variedad de técnicas según el tipo de estimulaciones realizadas:

- La naturaleza de la estimulación puede ser por fotones (ondas/radiaciones electromagnéticas) por longitudes de ondas (UV, visible, IR, micro-ondas), por rayos de electrones, o por energía mecánica (estreses estáticos o dinámicos, vibraciones aleatorias o modales, ultrasonidos, presiones hidro-estáticas), entre otras etc.

- Las estimulaciones pueden tener carácter temporal (función escalón, función almendra, función rampa, función impulso, funciones periódicas) y distribuciones espaciales (uniformes, puntuales, lineales, función Gaussiana, funciones periódicas) muy variadas (Legrandjacques, J-C Krapez, F Lepoutre, D Balageas, 1998).

### 3.7 Medidas de reflectividad

La reflectividad que percibe un detector en mediciones de campo, depende también de la rugosidad del objeto al que está enfocado. Conviene considerar que las superficies naturales no son, salvo excepciones, Lambertianas figura 3.4, es decir, que no reflejan uniformemente en todas las direcciones, con lo que la distribución de la radiancia presenta una fuerte dependencia del ángulo de incidencia y el de observación (Vaughan, P. (2001),).

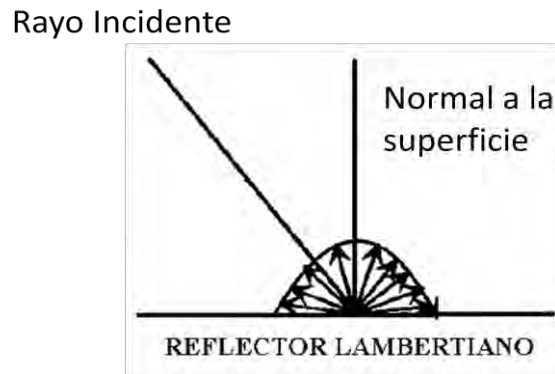


Figura 3.4. Reflector Lambertiano

### 3.8 Termografía infrarroja en plantas

Cuando una planta carece de agua sus estomas se cierran, esto es debido principalmente a la falta de turgencia en las células oclusivas. En esta situación, la transpiración, y por tanto la absorción de energía por evaporación se reduce, lo que hace que la temperatura de la hoja aumente (Zabalegui, 2011). Es decir, la temperatura aumenta al aumentar la situación de estrés. Es por esto, que la temperatura de la hoja se puede utilizar como indicador del estado hídrico de la planta.

Es posible medir la temperatura de la hoja mediante el uso de cámaras de infrarrojo. La detección del estrés hídrico de las plantas mediante la termografía infrarroja es un método en donde no es necesario el contacto con la planta. Este tipo de técnica va acompañada de un tratamiento informático (procesamiento digital de imágenes) que permite observar el comportamiento de la temperatura de las plantas, sin embargo, como se mencionó anteriormente, para poder medir la temperatura de forma exacta, es necesario conocer la emisividad de la hoja, la cual también se encuentra en constante cambio debido al estrés hídrico.

### 3.9 Región infrarroja asociado al contenido de agua

En la región denominada infrarrojo cercano (700 a 1300 nm), la vegetación verde y sana se caracteriza por la alta reflectancia (45 a 50%), causada por la difusión resultante de los índices de refracción del líquido intracelular y de los espacios intercelulares del mesófilo (Gausman, 1984).

Debido a las causas biofísicas de la reflectancia foliar, al incidir la radiación en una capa de hojas se refleja un 50% y transmite el restante. Si esa porción transmitida se



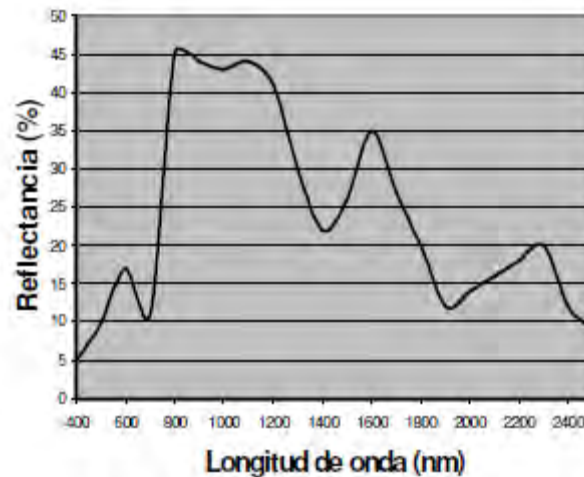
encuentra con otra capa de hojas, el proceso anterior se repetirá, y así sucesivamente (Figura 3.5).



**Figura 3.5.** Comportamiento espectral de una planta.

En el caso específico de la vegetación, la interacción con la radiación ocurre distintamente para cada longitud de onda del espectro (figura 3.6), donde se presenta la respuesta espectral de una hoja vegetal.

La absorción de la radiación electromagnética por el agua es un factor condicionante en la reflectancia de las hojas en la región del infrarrojo cercano, ocurriendo en 970 nm y en 1200 nm los puntos donde existen pequeñas absorciones.



**Figura 3.6.** Comportamiento espectral hoja verde sana

En las longitudes de onda del infrarrojo medio (1300 a 2600 nm), (Gausman, 1984 y Gates, 1990) exponen que la respuesta espectral de la vegetación está influida por la presencia del agua. Por este motivo en la (Figura 3.6) se verifican dos puntos de máxima absorción en 1400 nm y 1900 nm (Gauman, 1984).

Larcher (1995) conceptúa que en el límite superior del espectro se encuentra la radiación infrarroja IR, entre 750 y 4000 nm. Las plantas también reciben termo radiación (onda larga, IR 4000 a  $10^5$  nm) y ellas mismas emiten este tipo de radiación.

## **4. METODOLOGIA**

### **4.1 Objetivo**

El objetivo de este trabajo, es el desarrollo de un sistema que permitiera la medición de contenido hídrico en plantas por medio de termografía infrarroja, esto con el propósito de lograr la inspección de hojas de plantas, como un método alternativo diferente en comparación con los métodos descritos en el capítulo I, ya que algunos de ellos son altamente invasivos y por ende destructivos. Por lo tanto, se propone una técnica radiométrica basada en termografía infrarroja de reflexión de onda larga, para medir el potencial hídrico de diferentes hojas de árboles y maíz, que sea igual de fiable que los métodos actuales pero no invasiva, rápida y económica.

Unos de los aspectos importantes de este trabajo, fue el uso de la región no visible del espectro y en una región que no había sido explorada para cuantificar el contenido de agua de una muestra, aplicado al estudio del contenido hídrico de plantas, y que estos cambios pueden ser detectados a través de la reflectividad que presentan los cuerpos, específicamente las hojas.

Para abordar este estudio se plantearon los siguientes objetivos secundarios:

- Proporcionar resultados fiables para cada una de las mediciones.
- Proporcionar resultados comparables.
- Desarrollar en un futuro una metodología de medición, que sea más exacta y que permita mejorar el desarrollo de un prototipo que facilite la medición en campo.

### **4.2 Etapas del experimento**

En la Figura 4.1 se presenta una descripción de las actividades llevadas a cabo siguiendo una serie de etapas, donde se describe a grandes rasgos de modo de diagrama de bloques lo realizado, y cada una de ellas comprende una serie de experimentos para determinar el estado hídrico de una planta.

A partir de estas etapas se basa el protocolo de medición propuesto que debe ser uniforme y metódico, donde se muestra una visión en conjunto de todo el proceso que se realiza en la planificación, montaje y pruebas, en donde se busca tener conocimiento de las variables que intervienen en los resultados.



**Figura 4.1.** Etapas del proceso

### 4.3 Fuente de infrarrojo

La fuente implementada es un sistema activo, por medio de una estimulación externa para provocar un flujo de calor constante sobre el objeto de interés, en este caso la hoja.

La estimulación introduce una excitación térmica en la región infrarroja de onda larga al sistema y consta de cautín de estación marca Weller, con control automático de temperatura, de 50 Watts de 2 piezas, ya que se requería trabajar constantemente por largos periodos de tiempo y permite controlar la cantidad de calor necesaria.

La punta del cautín se ensambló a una placa de aluminio (Figura 4.2), se decidió por este material debido a las propiedades que presenta, ya que la conductividad térmica del aluminio tiene un efecto directo en la eficiencia de la transferencia de calor. Con lo cual se provoca una transferencia de calor interno entre la placa unida a la punta del cautín a una temperatura de 600 F. Como resultado se obtiene una fuente de radiación continua con ventajas como:

- Calor uniformemente distribuido en espacio y tiempo que se necesita.
- El calor radiado se puede adaptar a las características del sistema propuesto para el proceso.



**Figura 4.2.** Instrumento radiador de IR consta de un cautín unido a una placa de aluminio.

#### **4.4 Arreglo de fuente de excitación térmica**

Constituido por un soporte universal que se utiliza para realizar montajes de elementos. Está formado por una base o pie en forma de semicírculo, y desde el centro de uno de los lados tiene una varilla cilíndrica, donde se sujeta el instrumento de radiación infrarroja, mediante una doble nuez como se indica en la figura 4.3.

La posición del radiador se regula para que en la plataforma tenga un ángulo de inclinación, y sea dirigido hacia la muestra de manera estable con la flexibilidad de adaptar las distancias en el sistema.



**Figura 4.3.** Soporte para fuente de IR

#### 4.5 Instalación de cámara

El detector instalado es una cámara termográfica marca Xenics modelo Gobi640, el radiómetro (IR cámara) se adaptó a las características ambientales del área de trabajo. Ya que es importante tener condiciones estables controladas en la (Figura 4.4), se observa la distribución de cada uno de los elementos que soportan al detector.

Se aprecia la posición de la cámara sobre un soporte móvil permanente, en éste caso, apuntando hacia el blanco de observación y alineado con el ángulo de reflexión especular a la normal con la muestra (en este caso la hoja), la muestra a medir se coloca debajo de la cámara y se toma la imagen, la base donde se coloca la muestra permite introducir y sacar las muestras, con el objetivo de identificar el parámetro de contenido hídrico a través de análisis comparativo de los estados de las muestras antes y después de la estimulación en la pérdida de agua por la hoja.



**Figura 4.4.** Se observa el soporte de la cámara sobresaliendo y el radiador de infrarrojo.

#### 4.6 Obtención de imágenes y procesamiento digital de imágenes

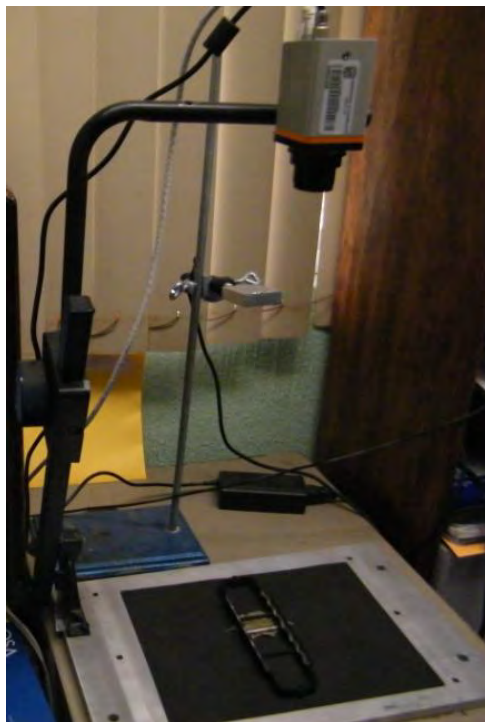
En esta etapa se llevó a cabo las técnicas de pre y post procesado de imágenes, primero adquiriendo las imágenes termográficas a través de detector (cámara) y por medio de un software para su captura y almacenamiento, posteriormente se hace un procesamiento

de imagen por medio de un programa de MATLAB (Mathworks 2012). Y consiste en asignar un conjunto de píxeles en la imagen digital a la energía reflejada por la muestra.

La energía obtenida de las imágenes de la cámara se obtiene a partir de los datos contenidos en la propia imagen, por medio de una medición de pixel a través de una operación sobre una segmentación, de las partes que se interesa sobre la imagen y asignando un valor en la escala de grises.

#### **4.7 Reflectancia a partir de imágenes**

El proceso de obtención de imágenes fue estandarizado para comenzar siempre a las 12 hrs, con condiciones de iluminación en la sombra y a una distancia de 40 cm entre la muestra y la cámara, se siguió una secuencia de 5 hojas numeradas, haciendo lo mismo para la referencia con el sistema termográfico (Figura 4.5).



**Figura 4.5** El arreglo consiste de la cámara termográfica con la cual se obtiene las imágenes para cuantificar la reflectividad.

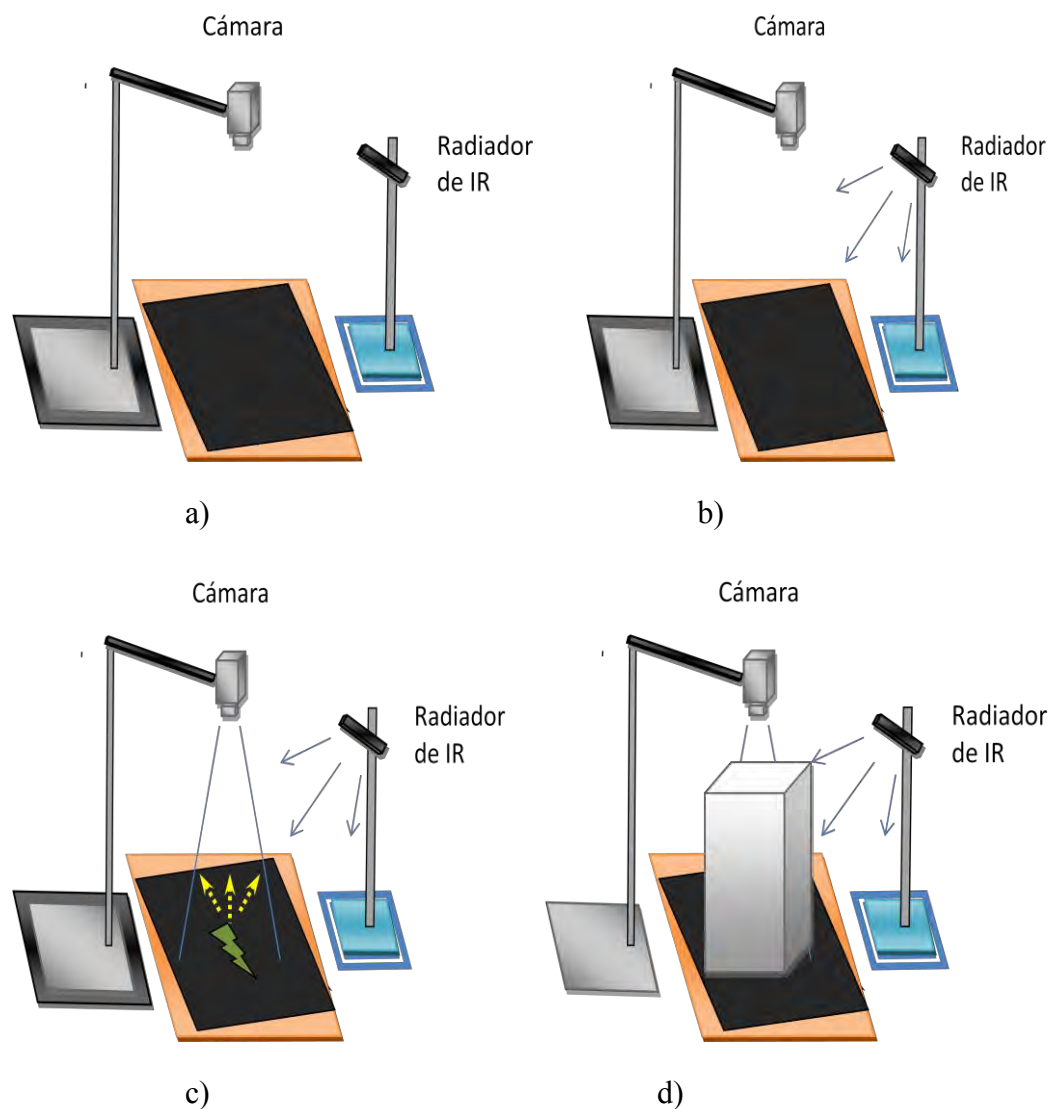
##### **4.7.1 Descripción del procedimiento**

La Figura 4.6 muestra la sucesión de las etapas de experimentos, donde se detalla el proceso realizado para cada una de las muestras. Cada etapa ilustra con una figura los elementos esenciales y comprende una serie de experimentos: montaje de equipo y adquisición de las imágenes de cada una de las hojas con un orden de progresión para que cada experimento esté en condiciones análogas, se adquirió la imagen de la



radiación de fondo, luego de la radiación de fondo junto con la radiación reflejada por el fondo, una vez que se tuvo la energía de fondo, se colocó la muestra y se adquirió la imagen de la misma en dos etapas, bajo la radiación incidente y sin ella, para poder hacer la resta de las imágenes y con ello obtener la energía reflejada.

El mismo procedimiento se siguió para medir la radiación incidente utilizando un reflector de oro, que se sabe tiene una reflectividad del 99%. Con ambas energías fue posible calcular la reflectividad de la hoja e indirectamente la emisividad de la misma si fuera necesario.



**Figura 4.6** Etapas de procedimiento experimental a) Sistema termográfico b) Precalentamiento tiempo de encendido del emisor de IR c) Medición de muestra de especie vegetal ( $E_R$ ) d) Medición de emisión de la muestra vegetal ( $E_E$ ). Medición de emisión de la muestra vegetal ( $E_E$ ).



En la práctica este trabajo se efectuó en condiciones ambientales estables, iluminación constante artificial, ausencia de viento, temperatura ambiente controlada.

Se tomaron en consideración una serie de variables instrumentales y de entorno que influyen en mayor o menor medida a la hora de realizar mediciones primero para conocerlas, segundo para manejarlas en la medida de lo posible y tercero corregirlas o tenerlas en cuenta a la hora de analizar los datos obtenidos tabla 4.1.

**Tabla 4.1** Variables que participan en la reflectividad medida.

Variables consideradas	Variables a medir
Peso de la hoja inicial	Reflectancia
Tiempo de encendido	Peso de la hoja secada
Temperatura del radiador	$E_e$ energía emitida
Referencia para la energía incidente	$E_r$ energía reflejada
Área de campo de visión de la cámara	$E_i$ energía incidente
Temperatura	
Iluminación	
Tiempo de secado	

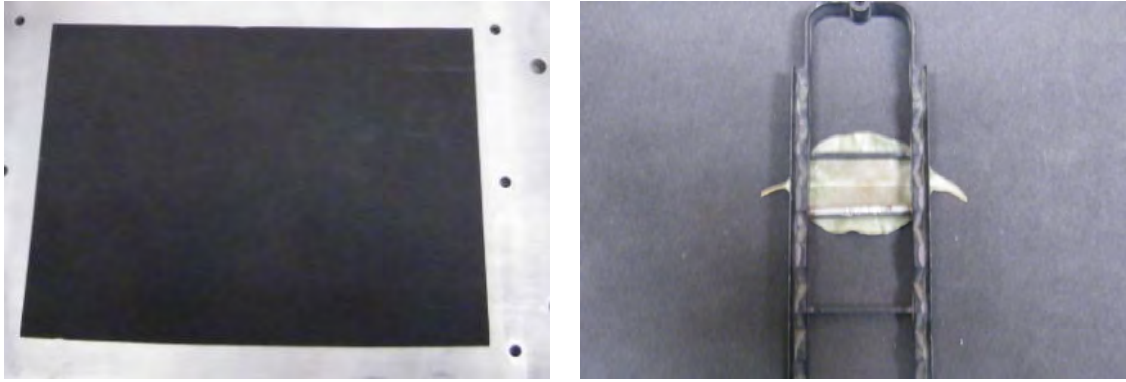
Las imágenes termográficas se adquirieron con el software Xenet (Xenics Inc.) de la propia cámara de infrarrojo utilizada. Para cada una de las etapas se tomaron 30 imágenes tanto para la referencia de una placa de oro, como las muestras de hojas de planta y de la emisión propia de la hoja, de estas imágenes se obtuvieron los valores de las energías involucradas con el uso de un programa en Matlab que permite leer los valores de luminancia de los píxeles en niveles de gris de las imágenes obtenidas

Por otra parte, los valores de energía de distintas hojas se utilizaron para obtener el valor de reflectancia. Para esto se llenó una base de datos en Microsoft Office Excel 2011, para realizar las operaciones aritméticas de obtención de reflectancia.

#### 4.7.2 Control de reflectividad de fondo

Para obtener la energía de la referencia y del objeto de interés, se evitó interferencia que pudieran afectar a la medición proveniente de objetos cercanos. Para ello el sistema propuesto tiene una base negra en la superficie donde se coloca la muestra (Figura 4.7), evitando así la reflectividad de fondo en la escena del área cubierta por la cámara, al momento de tomar las imágenes.

En realidad el sistema observado no es considerado como el único objeto responsable del flujo de radiación captado por la lente, por lo que es necesario contar con una superficie que absorba la radiancia, de baja reflectividad, especialmente en el infrarrojo.



**Figura 4.7** Superficie para evitar interferencias de reflectividad de otros objetos próximos.

#### **4.7.3 Proceso de secado de hojas**

El secado de las muestras es el proceso de extraer humedad. Para llevar a cabo la medición de la reflectancia de las hojas, y estudiar su comportamiento al presentar pérdida de humedad se siguieron dos procedimientos:

1.-El secado de las hojas se hizo en condiciones ambientales a la sombra, y realizando mediciones termográficas diariamente para observar el comportamiento de la reflexión, pero debido a los cambios que presentan las hojas al paso de los días causadas por su marchites entre otros efectos, se encontraron variaciones en las mediciones así como desventajas como:

- El proceso de secado es lento.
- Cambios en la estructura geométrica de la hoja.

2.-Para acelerar el proceso de secado de las hojas y evitar que se marchiten, se utilizó el método de secado por microondas y medición de pérdida de peso para cotejar con la medición de contenido de agua de la hoja de maíz por medio de imágenes de infrarrojo y haciendo lo mismo para hojas de arboles de otras especies que se seleccionaron, se pesaron inicialmente, y posteriormente se tomaron imágenes de medición de la reflectividad para su comparación.

Se aprovechó el uso de este método para controlar las condiciones de secado. Se hicieron pruebas previas introduciendo hojas, registrado los tiempos de secado y modificando los tiempos de funcionamiento.

Los tiempos se consideraron para que las hojas no se quemen, este proceso se repitió hasta alcanzar un minuto, y que en la bascula hubiera un cambio significativo en el peso de la hoja.

Con el objetivo de tener las mismas condiciones para las diferentes tipos de hojas se tomo en cuenta:

- Tiempo de deshidratación. Se tomaron tiempos de entre 10 y 5 segundos.
- Condiciones de iluminación del área de trabajo bajo la sombra.
- Altura de la cámara fija
- Numeración de hojas para seguir una secuencia

#### 4.7.4 Pesado de hojas

Para el pesado de hojas se utilizo una balanza analítica de uso de laboratorio de la cual dependen básicamente todos los resultados analíticos, en la tabla 4.2, se muestra el comportamiento en peso de una hoja al ser sometida al proceso de secado.

**Tabla 4.2** Peso normal de una hoja y peso posterior al método de secado con microondas.

Peso Normal en (gs)	Posterior al secado (gr)
0.5849	0.4698

Antes de iniciar las mediciones y pesado de las hojas se tuvieron algunos cuidados operativos como:

- Verificar siempre la nivelación de la báscula.
- Poner el plato de medida en el centro.
- Realizar la auto calibración con el recipiente de medida.
- Usar pinzas para el manejo de las muestras al colocarlas dentro del a bascula.
- Verificar que el indicador muestre cero después de la calibración. Se calibró la balanza de ser necesario.
- Leer la lectura de la operación de medición luego que el detector automático dé estabilidad en el resultado.
- Calibrar la balanza regularmente.

#### 4.7.5 Calculo de reflectancia

Para expresar la reflectancia de cada muestra se utilizó la siguiente expresión:

$$\rho = \frac{E_r - E_e}{E_i}$$

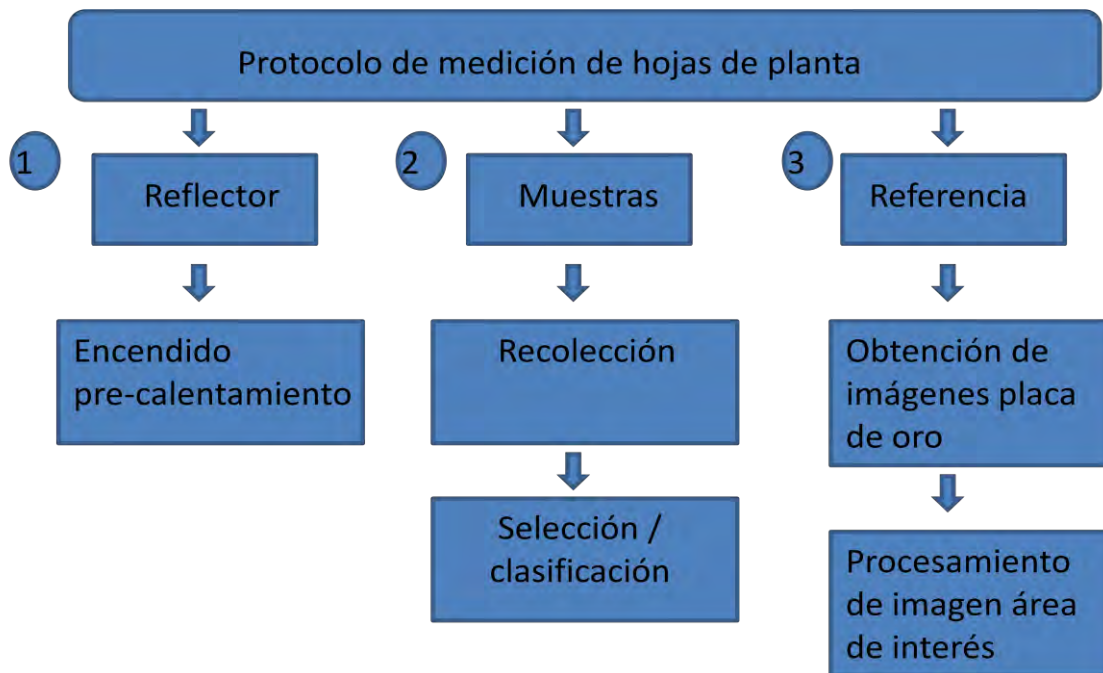
Donde  $E_r$  es la energía reflejada,  $E_e$  la emitida y  $E_i$  es la incidente. El resultado es una expresión de tanto por ciento de reflectividad que fué correlacionada con la pérdida de peso de la hoja por falta de agua.

#### 4.8 Análisis de datos

El objetivo en esta fase era conocer, mediante cambios en las mediciones y modificaciones en el sistema el comportamiento en los siguientes factores:

- Tiempos de exposición al radiador
- Tiempo transcurrido entre mediciones
- Tiempos de secado de hojas
- Tipos de hojas.

La información obtenida permitió comparar mediciones de diferentes tipos de hojas, de deficiencia hídrica (hojas de maíz y arboles), en un proceso de repetitividad para poder comparar mediciones. La Figura 4.7 muestra el proceso de medición explicado anteriormente en forma de diagrama de flujo, para dar una idea general del proceso de medición en cuatro etapas.



Medición de hojas de planta y obtención de reflectancia

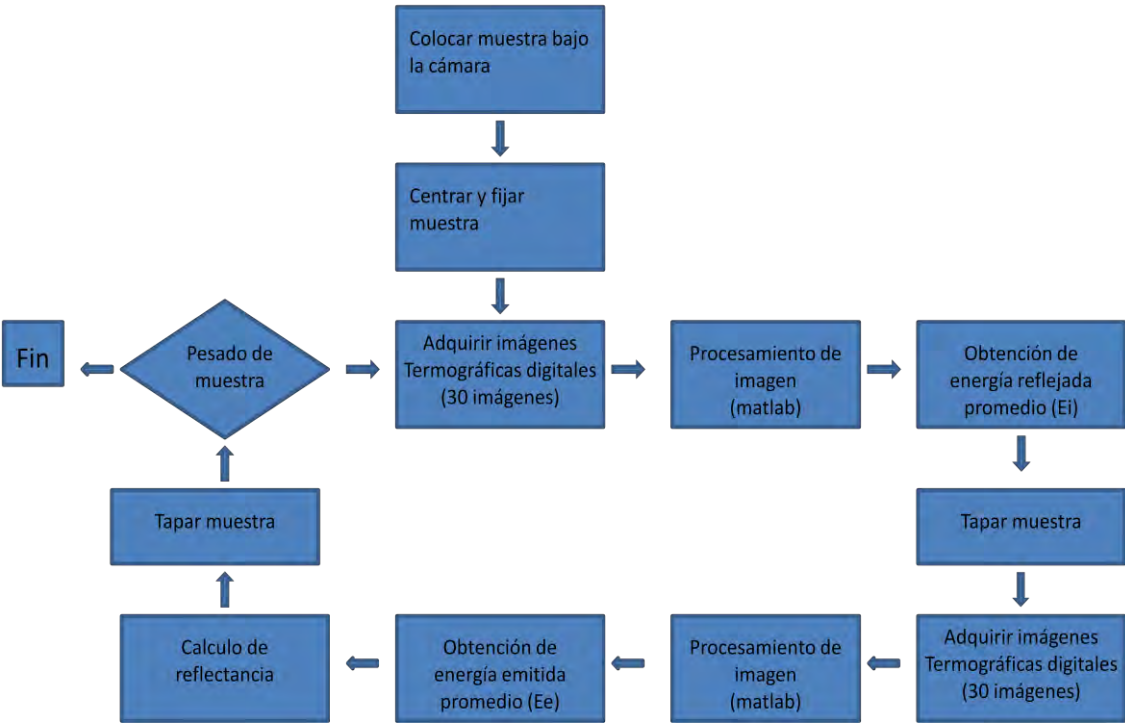


Figura 4.8 Protocolo general de medición de hojas de planta.

## 5. RESULTADOS

Los resultados obtenidos en los experimentos para las etapas mencionadas en el capítulo anterior, está centrado en el objetivo de medir el parámetro reflectancia. Para llevar a cabo la validación de este procedimiento, se utilizaron varios tipos de hojas de árboles y de maíz, con características diferentes, con el fin de probar que el procedimiento es común independientemente del tipo o especie de hoja.

### 5.1 Especies medidas

La elección de las plantas medidas se enfoca en hojas de árboles, gran parte encontradas en el área de jardín del Centro de Investigaciones en Óptica, ya que se encuentran una gran variedad, seleccionándose árboles frutales como: limón (*Citrus limonum* Risso), aguacate (*Persea americana*), granada (*Punica granatum*), laurel de India (*Ficus microcarpa*), mezquite (*Prosopis glandulosa*) y maíz (*Zea mays*).

Aunque la mayor parte de los experimentos se llevaron a cabo con laurel de la India debido a su abundancia, con lo cual se redujo el tiempo de desecación, al recoger las hojas y las mediciones.

### 5.2 Resultados de mediciones

Se buscó conocer el resultado de la interacción de la radiación IR con el tejido vegetal, para relacionar la reflexión de radiación por las plantas, específicamente las hojas con la pérdida de humedad. En esta parte el interés se centró sobre hojas en sí, sin tomar en cuenta otras partes, como tallo.

Para validar los resultados, fue necesario conocer el contenido de humedad de la muestra en el momento de cada medición, para así poder analizar la relación entre esta y la pérdida de peso por ejemplo, que experimenta la hoja en el proceso llevado a cabo de desecación. El nexo de la radiación para diferentes tipos de hojas entre la reflectividad y el peso de las hojas, servirá para expresar una curva de comportamiento y analizar su relación.

#### 5.2.1 Reflectancia de hojas de maíz

Aunque en una primera etapa se trabajó mucho con el laurel de India, era de especial interés poder medir muestras de hojas de maíz, y el análisis de la variación de la reflectancia de hojas de maíz, los resultados obtenidos, muestran que la reflectancia fue afectada por los cambios en el método de secado de las hojas. Los datos obtenidos fueron extraídos de cinco hojas que fueron pesadas y clasificadas (Ver Tabla 5.1).

**Tabla 5.1** Resultado del análisis de la variación de reflectancia de hojas de maíz.

Hoja 1	Er-Ee	Reflectancia	Peso gr
	0.04807	0.12690074	0.7839
	0.04523	0.11940338	0.5897
	0.04955	0.13080781	0.4634
	0.01988	0.05248152	0.3407
	0.02678	0.07069694	0.2546
	0.02971333	0.07844068	0.2164
	-0.00415667	-0.01097326	0.2135

a)

Hoja 2	Er-Ee	Reflectancia	Peso gr
	0.04655333	0.12289686	0.8121
	0.04484667	0.11839142	0.5705
	0.04535667	0.11973778	0.4066
	0.01880667	0.04964802	0.31
	0.02270333	0.05993487	0.2665
	0.02968333	0.07836148	0.2586
	-0.0059	-0.0155755	0.2553

b)

Hoja3	Er-Ee	Reflectancia	Peso gr
	0.04779	0.12616156	0.7474
	0.04786667	0.12636397	0.596
	0.03402	0.08980993	0.4712
	0.01373333	0.03625483	0.3412
	0.02169667	0.05727738	0.2548
	0.01200667	0.03169659	0.2274
	-0.00034333	-0.00090636	0.2242

c)

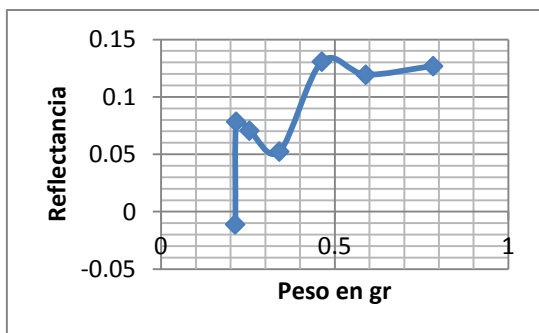
Hoja 4	Er-Ee	Reflectancia	Peso gr
	0.04134	0.10913411	0.8468
	0.04654667	0.12287928	0.6904
	0.04065333	0.10732136	0.5374
	0.02165333	0.05716296	0.4461
	0.01051667	0.02776312	0.3566
	-0.00105333	0.0027807	0.277
	-0.00598	-0.01578669	0.2652

d)

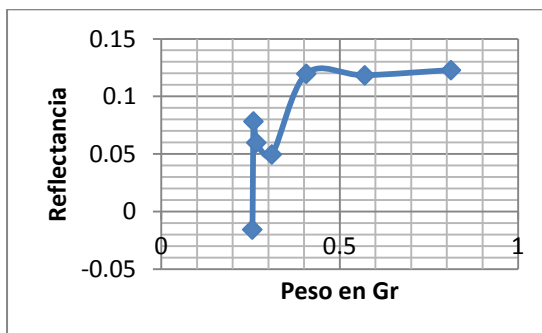
Hoja 5	Er-Ee	Reflectancia	Peso gr
	0.04929667	0.13013904	0.04929667
	0.04103667	0.10833334	0.04103667
	0.03307	0.08730201	0.03307
	0.02702667	0.07134813	0.02702667
	0.0129	0.03405491	0.0129
	0.01082333	0.02857268	0.01082333
	-0.00596	-0.0157339	0.00596

e)

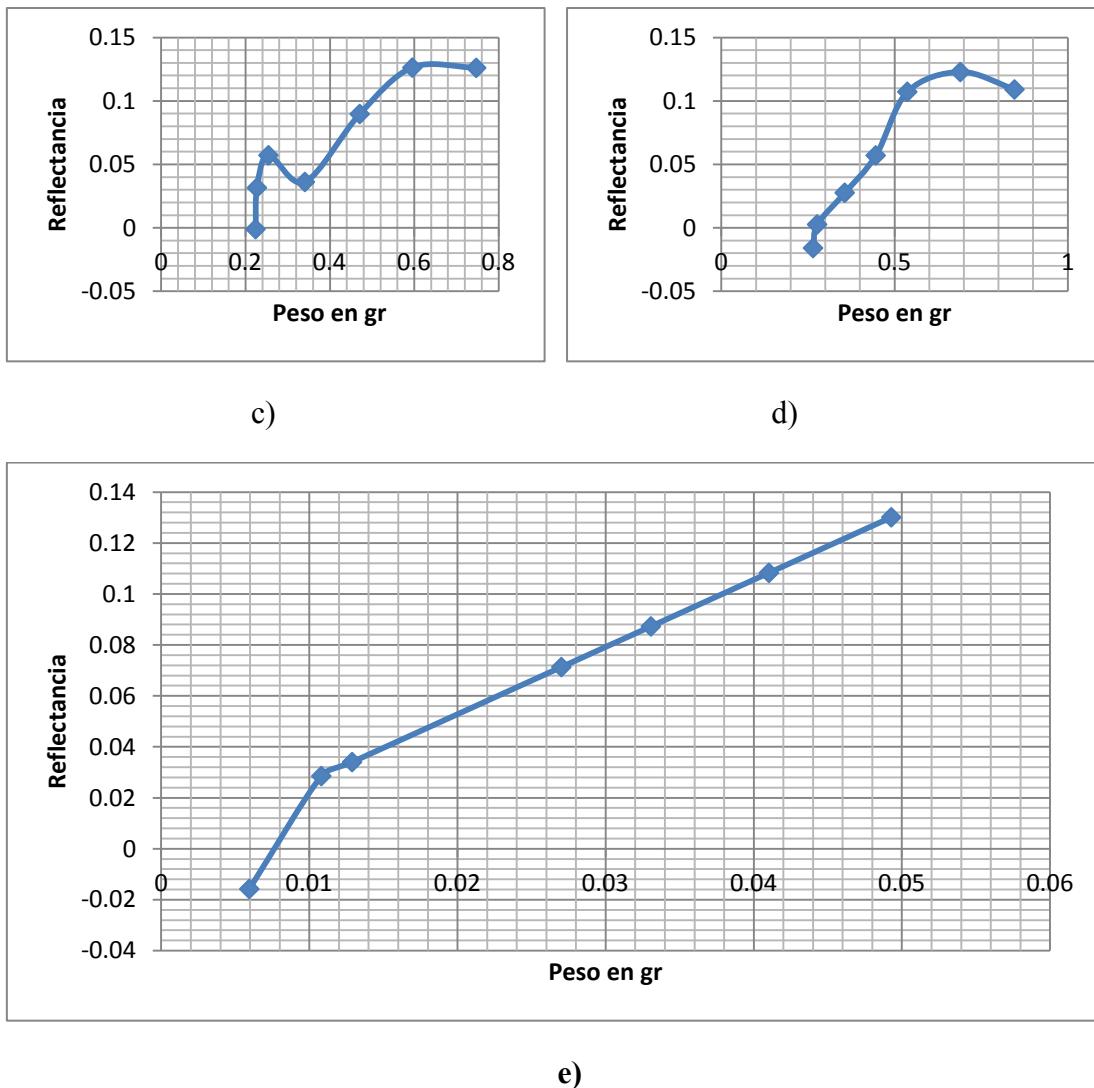
Las comparaciones realizadas en hojas recién cortadas y sometidas a medición, muestran variaciones en las reflectividades al perder la cantidad de humedad en las hojas. El método para el secado produjo hojas con diferente cantidad de agua, por lo que los niveles de reflexión varían para cada una de las muestras de hojas (Figura 5.1).



a)



b)



**Figura 5.1** Variaciones de reflectividad a medida que la hoja de maíz pierde humedad, comparaciones de reflectancia contra peso para las hojas de maíz.

En la figura se observa que la disminución de reflectancia es una deficiencia de agua, donde se aprecia una correlación significativa con la pérdida de agua, por lo que la reflexión tiene una tendencia hacia menor reflectividad.

### 5.2.2 Reflectancia de hojas de aguacate

El análisis de la variación de reflectancia para las hojas de aguacate, se observa que es afectada por los cambios en el proceso de desecación Tabla 5.2.



**Tabla 5.2** Resultado del análisis de la variación de reflectancia de hojas de aguacate.

Hoja 1	Er-Ee	Reflectancia	Peso gr
	0.06501333	0.1716297	0.4936
	0.05231	0.13809398	0.4347
	0.04195333	0.11075325	0.3975
	0.04482	0.11832101	0.3764
	0.03706667	0.09785288	0.3474
	0.03417	0.09020591	0.2886
	0.03701	0.09770327	0.2597

a)

Hoja 2	Er-Ee	Reflectancia	Peso gr
	0.07078667	0.18687083	0.5506
	0.05013333	0.13234776	0.5044
	0.03645333	0.09623371	0.4492
	0.04423667	0.11678107	0.4192
	0.03538333	0.093409	0.3656
	0.03879	0.10240232	0.3029
	0.03232	0.08532207	0.2698

b)

Hoja2	Er-Ee	Reflectancia	Peso gr
	0.06051667	0.1597589	0.4735
	0.04905333	0.12949665	0.4067
	0.03713667	0.09803767	0.3531
	0.04299667	0.11350758	0.308
	0.03464	0.09144667	0.2587
	0.04281333	0.11302357	0.2078
	0.03569667	0.09423619	0.1912

c)

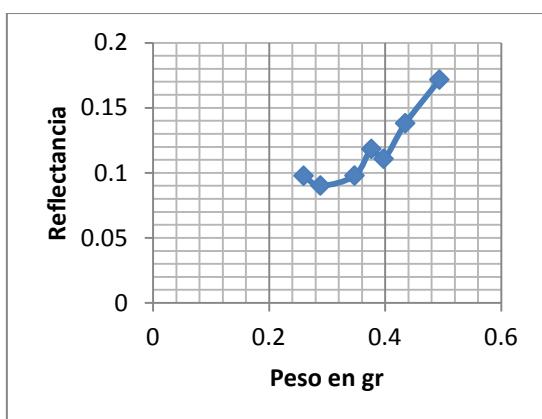
Hoja 3	Er-Ee	Reflectancia	Peso gr
	0.04731	0.1248944	0.5028
	0.04064333	0.10729496	0.4522
	0.04885	0.12895987	0.3668
	0.04388667	0.1158571	0.3155
	0.03539333	0.0934354	0.2887
	0.03575333	0.09438577	0.2367
	0.03679333	0.09713128	0.2211

d)

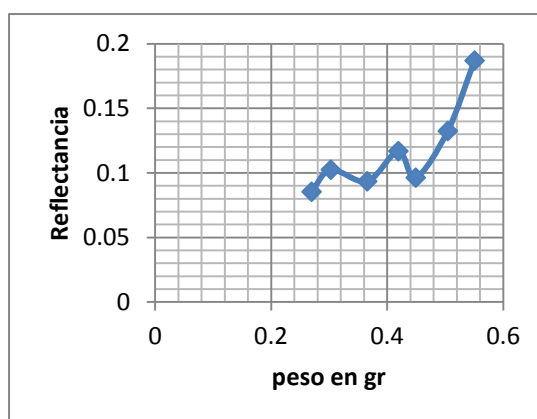
Hoja 5	Er-Ee	Reflectancia	Peso gr
	0.04582667	0.12097854	0.3898
	0.04313	0.11385956	0.3031
	0.04141667	0.10933651	0.2787
	0.04142	0.1093453	0.2659
	0.03467333	0.09153466	0.2397
	0.02655667	0.07010737	0.2006
	0.02578333	0.06806581	0.1802

e)

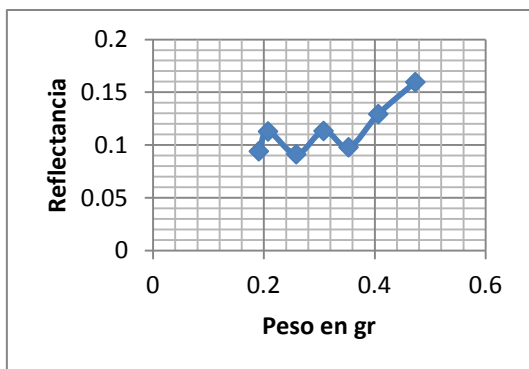
Las comparaciones a partir de las gráficas muestran la tendencia a disminuir la reflectancia al perder agua, aunque se presentan en algunos puntos variaciones. En este caso los cambios, son mayores que en el experimento anterior observándose aumentos y disminuciones de reflectividad teniendo en algunas ocasiones mediciones similares a las anteriores o incluso mayores, debido a que las diferencias en el peso de la hoja, no son muy significativos, (Figura 5.2).



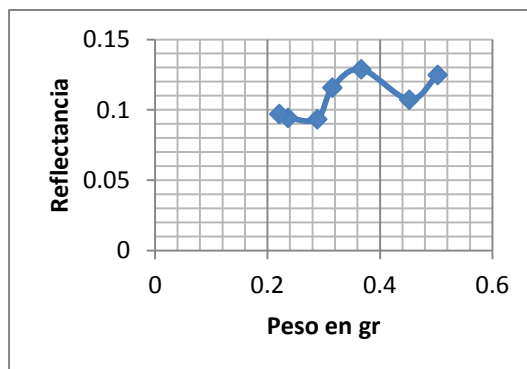
a)



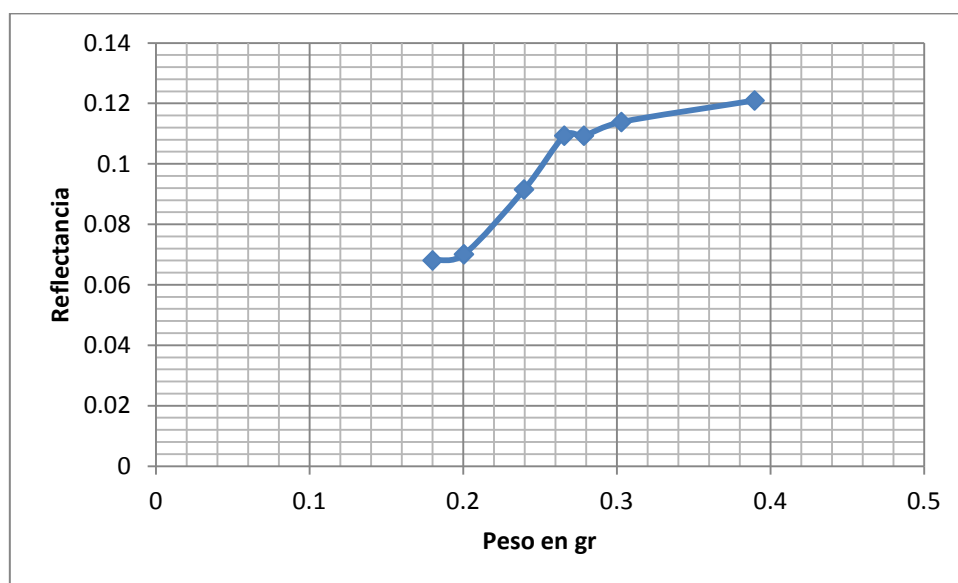
b)



c)



d)



e)

**Figura 5.2** Comparaciones de reflectancia contra peso para las hojas de aguacate

### 5.2.3 Reflectancia de hojas de granada

El análisis como en el experimento anterior reveló que las variaciones se mantienen uniformes con el mismo comportamiento Tabla 5.3.

**Tabla 5.3** Resultado del análisis de la variación de reflectancia de hojas de granada.

Hoja 1	Er-Ee	Reflectancia	Peso gr
	0.04694333	0.12392643	0.1752
	0.03433	0.0906283	0.1456
	0.03629333	0.09581133	0.1217
	0.03872333	0.10222632	0.1056
	0.04051333	0.10695177	0.095
	0.03028333	0.07994543	0.915

a)

Hoja 2	Er-Ee	Reflectancia	Peso gr
	0.04727333	0.1247976	0.1799
	0.03814	0.10068638	0.1494
	0.04189667	0.11060367	0.125
	0.03962	0.10459345	0.1037
	0.04354333	0.11495071	0.0954
	0.03471333	0.09164026	0.0937

b)

Hoja2	Er-Ee	Reflectancia	Peso gr
	0.03778	0.09973601	0.1792
	0.03524667	0.09304823	0.1515
	0.04100667	0.10825414	0.1288
	0.04863667	0.1283967	0.1082
	0.05269	0.13909715	0.095
	0.02334	0.06161563	0.092

c)

Hoja 3	Er-Ee	Reflectancia	Peso gr
	0.03668333	0.09684089	0.2404
	0.03301667	0.08716122	0.2061
	0.04076	0.10760296	0.1789
	0.05223333	0.13789158	0.1496
	0.03971667	0.10484865	0.1343
	0.02692	0.07106653	0.13

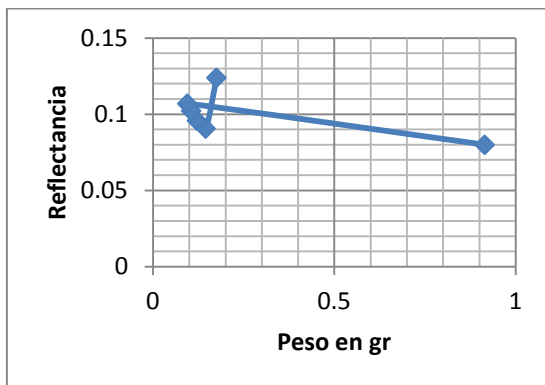
d)

Hoja 5	Er-Ee	Reflectancia	Peso gr
	0.03979333	0.10505103	0.2302
	0.03507333	0.09259063	0.1957
	0.04103333	0.10832452	0.1635
	0.05364667	0.14162268	0.1355
	0.04677333	0.12347764	0.1212
	0.02960667	0.07815911	0.1186

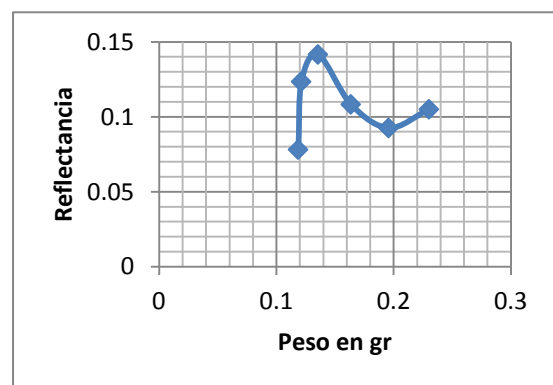
e)

También en este caso parece haber una relación entre la pérdida de humedad y una disminución de la reflectividad, aunque también en algunos puntos observándose aumentos y disminuciones, en este caso parece haber un agrupamiento de puntos (Figura 5.3).

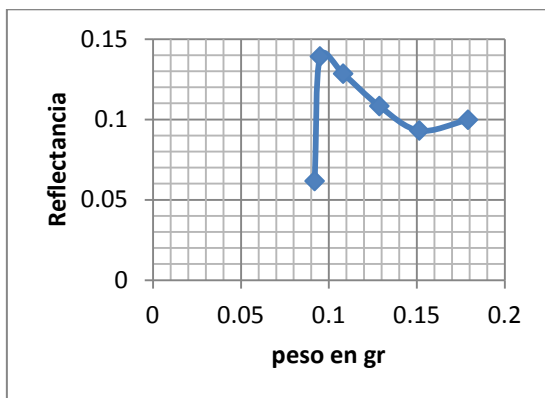
De nuevo se observa en la curva 5.4 c), un comportamiento similar con respecto a lo que se venía obteniendo en mediciones anteriores.



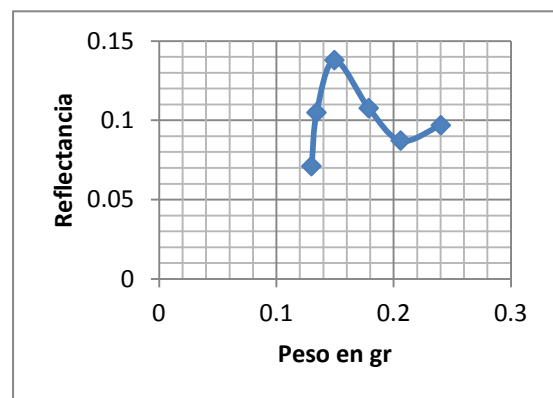
a)



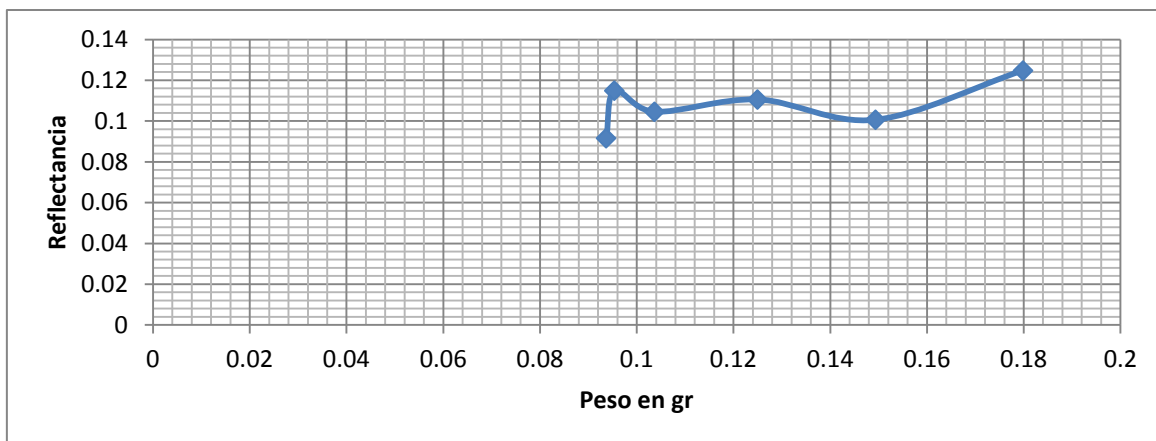
b)



c)



d)



e)

**Figura 5.3** Comparaciones de reflectancia contra peso para las hojas de granada.

### 5.2.4 Reflectancia de hojas de laurel de la India

A través de la técnica de termografía la detección, registro y análisis de las alteraciones ocurridas en las hojas se basaron en una misma especie de árbol (fikus), lo que permitió evaluar el estado hídrico de las hojas, detectando los cambios que presentaron las hojas sometidas a diferentes modificaciones en el sistema, así como tiempos de secado y seleccionado hojas adultas y jóvenes de características físicas comunes, encaminado a observar su respuesta y obtener resultados similares Tabla 5.4.

**Tabla 5.4** Resultado del análisis de la variación de reflectancia de hojas de laurel de la india.

Hoja 1	Er-Ee	Reflectancia	Peso gr
	0.06119333	0.16154522	0.5748
	0.05709667	0.15073039	0.5005
	0.02913667	0.07691835	0.4269
	0.02738667	0.0722985	0.3598
	0.02676667	0.07066175	0.3288
	0.01906667	0.0503344	0.2961

a)

Hoja 2	Er-Ee	Reflectancia	Peso gr
	0.07300333	0.19272262	0.5425
	0.06385667	0.16857621	0.5118
	0.02569333	0.06782822	0.4503
	0.03286333	0.08675641	0.4115
	0.02989667	0.07892468	0.377
	0.02135	0.0563622	0.3148

b)

Hoja2	Er-Ee	Reflectancia	Peso gr
	0.07455333	0.19681449	0.5352
	0.05947333	0.15700457	0.4743
	0.14525667	0.38346534	0.4128
	0.03112	0.08215417	0.3381
	0.03675	0.0970169	0.3061
	0.01816333	0.04794966	0.2565

b)

Hoja 3	Er-Ee	Reflectancia	Peso gr
	0.06525333	0.17226328	0.5849
	0.05103667	0.1347325	0.4698
	0.03617	0.09548574	0.4246
	0.02734	0.07217529	0.3917
	0.02585	0.06824182	0.3305
	0.01487333	0.03926433	0.2994

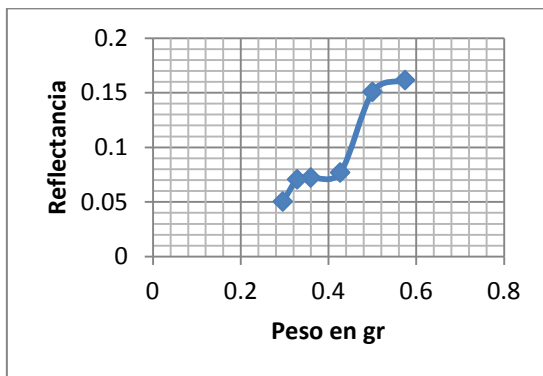
d)

Hoja 5	Er-Ee	Reflectancia	Peso gr
	0.07423	0.19596093	0.5791
	0.05573667	0.1471401	0.4751
	0.02753667	0.07269448	0.4412
	0.02817333	0.07437521	0.4053
	0.02062667	0.05445267	0.3513
	0.00917667	0.02422563	0.293

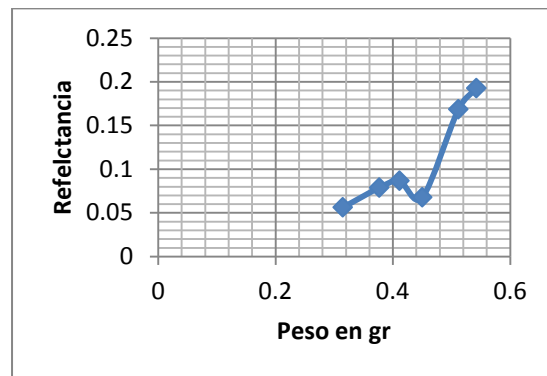
e)

Se encuentran mayores valores de reflectancia en hojas adultas, ya que los tratamientos tuvieron un efecto más intenso en éstas en comparación con las hojas jóvenes. Lo anterior, debido a que éstas contienen una mayor cantidad de humedad en los tejidos vegetales, con lo que es posible tener un mejor control en los tiempos de secado.

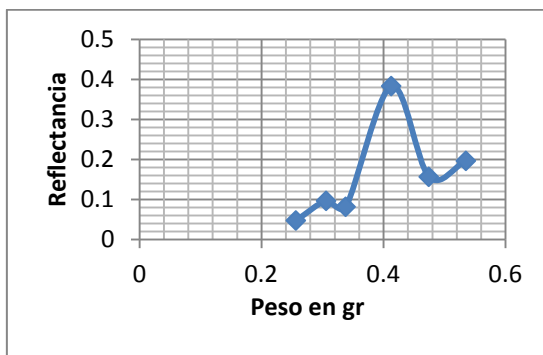
De acuerdo con el experimento puede inferirse que las hojas adultas son más sensibles a perder humedad (Figura 5.4).



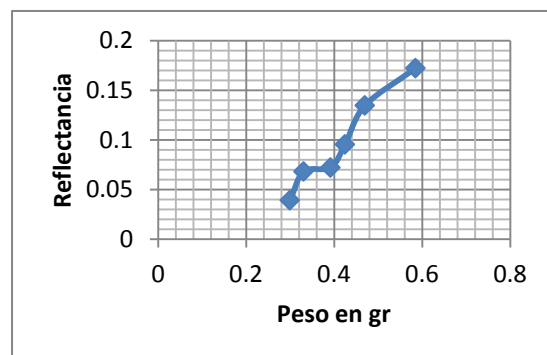
a)



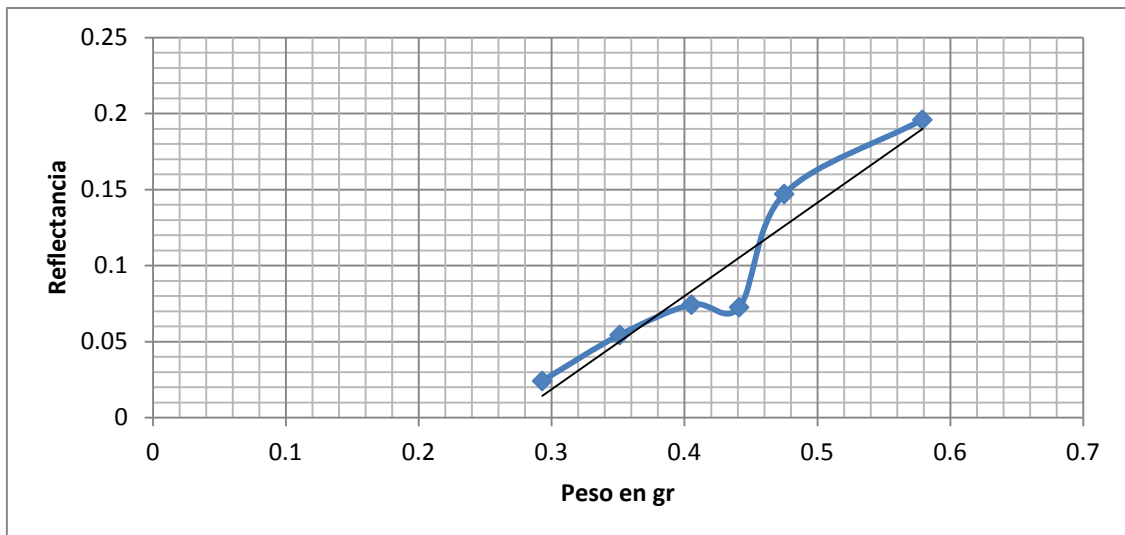
b)



b)



c)



d)

**Figura 5.4** Comparaciones de reflectancia de hojas adultas de Laurel de la India.

A este nivel se pueden extraer conclusiones basadas en el análisis visual entre gráficos presentados (Figuras 5.1 a 5.5), se puede comprobar las variaciones a lo largo de la pérdida de peso, las diferencias en las curvas son de escasa magnitud, pero muy marcado el comportamiento no lineal que presentan algunas hojas. Esta diferencia responde a las diferencias entre especies de hojas, en lo que se refiere a la velocidad de secado y el deterioro que presentan durante el proceso, sobre todo en su estructura celular, que se pudo controlar con el método usando el microondas.

Aunque a medida que van perdiendo agua las hojas, el deterioro como se mencionó produce una reducción en el tamaño, y conforme avanza el proceso se obtiene un rizamiento, lo que causa efectos negativos al momento de realizar las mediciones ya que refleja en todas direcciones de manera distinta en cada medición, produciendo las variaciones observadas en las gráficas.

### 5.3 Comparación con el método de cámara de presión Scholander

La cámara de presión (bomba de Schölander) es el mejor índice para medir el estado del agua en la planta y en los tejidos, por su sencillez, rapidez y confiabilidad (Idelsul, 2014).

### *Obtención de medición:*

La presión en la cámara es similar a la tensión de la savia en los vasos de la hoja, y proporciona el valor del potencial hídrico, que se mide en bares o mega pascales (MPa), siendo 1 bar = 0,1 MPa, considerándose siempre como valores negativos.

Mientras mayor sea el estrés hídrico de la planta, mayor será la presión que se debe imprimir a la cámara para vencer la tensión y lograr el reflujo de savia (Como medir el estado hídrico de una planta de vid a través de una cámara de presión, 2013).

### *Valores obtenidos*

Se discuten las ventajas, desventajas y similitudes en la utilización de la cámara de presión y el método propuesto para medir el potencial hídrico. La comparación de los resultados con los dos métodos es afectada por: la técnica utilizada en la forma de manejo de las muestras, el procedimiento, y la técnica de medición. En las cuales en cada uno de los ensayos se busca obtener a partir de condiciones de estado hídrico de las hojas de planta, diferentes rangos como lo son:

- Plantas bien hidratadas
- Plantas bajo condiciones de estrés

De las cuales se pretende dar explicación con un rango más amplio, para poder determinar estados de estrés intermedio y altos:

- Sin estrés
- Estrés medio
- Estrés moderado
- Estrés alto
- Estrés severo

La variabilidad en las mediciones se ve afectada por la metodología empleada, así como la forma de interpretación de los datos tabla 5.5:

**Tabla 5.5** Comparación entre metodologías.

<b>Tipo de equipo</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Limitaciones</b>
<b>Cámara Scholander</b>	<ol style="list-style-type: none"><li>1.-Se tiene una medida del estado hídrico de la planta y no del suelo.</li><li>2.-Puede utilizarse para el monitoreo y manejo de riego.</li><li>3.-Es muy útil cuando se manejan estrategias de Riego Deficitario Controlado.</li><li>3.-El equipamiento es muy robusto, exento de problemas de calibración o similares.</li><li>4.-No requiere de</li></ol>	<ol style="list-style-type: none"><li>1.-La medida obtenida no es de interpretación directa..</li><li>2.-No permite la automatización del riego.</li><li>3.-Impide tomar un gran número de muestras.</li><li>4.-En muestras pequeñas es difícil realizar la medición.</li></ol>

	instrumentación compleja. 5.- No son necesarios diferentes datos para la medición.	
<b>Método propuesto (Termografía Infrarroja)</b>	1.- Se puede utilizar en diferentes especies de hojas y tamaños. 2.-Rápido, seguro y no invasivo.	1.- Hasta el momento es necesario usarlo en laboratorio. 2.- Se requiere de un tratamiento de imagen. 3.-Impide tomar un gran número de muestras.

Se encuentran ciertas similitudes en la interpretación de datos, en el método de la cámara de presión se toman las mediciones como valores negativos, por lo que si el estrés hídrico es mayor, el valor de la presión se aumenta de manera negativa y en el caso del método propuesto, el estrés hídrico es representado por una disminución en la reflectancia, al disminuir la cantidad de agua las hojas de la planta.

En ambas metodologías se predice una relación de variables es decir:

- Para el caso de la cámara de presión la relación entre la presión y el fluido que sale del tallo o la hoja.
- Para el caso del método propuesto entre cambios en el peso y variaciones en la reflectancia.

De los diferentes métodos la cámara de presión es hoy día el más utilizado para valorar el estado hídrico de la planta, por lo que en la metodología propuesta busca profundizar más en la interpretación de este parámetro para mejorar su capacidad frente a los métodos convencionales. Aunque es importante observar que a partir de los valores de medición obtenidos en este trabajo no es posible encontrar una correlación suficiente para establecer la metodología propuesta como alternativa a la cámara de presión, ya que son estimaciones orientativas que rodean a la medición del estado hídrico en plantas.



## 6. CONCLUSIONES

El interés de estudiar los cambios de reflectividad que presentan las hojas de planta por pérdida de humedad, con el método de termografía brinda una estimación del estado hídrico de las plantas.

Especies como la hoja de maíz y laurel de la India se aprecia de forma mucho más clara los efectos de la pérdida de humedad, las curvas presentan cierta tendencia en la trayectoria con una separación escalonada que permite observar resultados más evidentes en las correlaciones de peso y reflectividad

Para cada planta a excepción de la hoja de maíz, basta con una simple comparación visual para comprobar el error que puede derivarse con el manejo de las muestras figuras (5.1 a 5.4). Se observan variaciones diferentes en cada tipo de hoja, las cuales son más evidentes y variables en las hojas de granada.

Aspectos como la fisiología de las hojas entre las especies influye en las variaciones de reflectancia, así como diferencias en la velocidad de secado lo que da lugar a una disminución desigual en las graficas.

Para las hojas de aguacate y granada la evolución de las condiciones de secado asociado en el desarrollo del protocolo, da información sobre comportamiento de puntos dispersos de reflectancia. En un intento por controlar este efecto, se busco la sujeción de las hojas y prensarlas con una base de metal.

Sin embargo, al relacionar los datos obtenidos de todas las especies, a primea vista pareciera algo confuso en algunas zonas, pero en cierto sentido es la intensión de observar en diferentes tipos de especies.

Por lo que los datos obtenidos arrojan una relación importante mostrando suficiente semejanza que incluye información que permite tener una alternativa más a los métodos vistos en el capítulo I, ya que se busca explicar con una mayor exactitud las diferentes variaciones que hay en la estimación del estado hídrico.

Así el método propuesto, puede tomarse como orientativo y alternativo. Y que estas son las primeras aproximaciones, lo que alienta a seguir trabando en la técnica para valorar su aplicación.

## 7. BIBLIOGRAFIA

Amperis Products. *Cámaras termográficas*. Recuperado de <http://amperis-products.blogspot.mx/2007/06/camaras-termograficas.html>.

Asner, G. P. (1998). Biophysical and biochemical sources of variability in canopy reflectance. *Remote Sensing of Environment* **64**: 234-253.

Boyer, J.S. (1972). Use of isopiestic technique in thermocouple psychrometry. I. Theory. In *Psychrometry in Water Relations Research*, R.W. Brown and B.P. van Haveren, eds., pp. 51–55, Utah Agricultural Experiment Station: Logan, Utah. Reprinted by permission of the Utah Agricultural Experiment Station.

Brown, T.L, LeMay., Bursten, B.E y J.R. Burge. (2004). *Química la ciencia central. Novena Edición*. Prentice-Hall. México.

Campbell Scientific, Logan, Utah, brochure *the press is now sold by Decagon Devices, Inc.* Reprinted by permission of Decagon Devices, Inc., Pullman, Washington.

Carolis y P. Amodeo. (1980). *Basic Problems in the reflectance and emitance properties of vegetation*. En. *Fraysse*. (Ed) Remote sensing application in agriculture and hydrology. Netherlands.

Como medir el estado hídrico de una planta de vid a travez de una cámara de presión, 2013. <http://urbinavinos.blogspot.mx/2013/03/como-medir-el-estado-hidrico-de-una.html>

Curran, P. J., J. L. Dungan, and D. L. Peterson. 2001. *Estimating the foliar biochemical concentration of leaves with reflectance spectrometry*: Testing the Kokaly and Clark methodologies. *Remote Sens. Environ* **76**: 349-359.

Curtis. H., and Barnes. N. (1997). *Invitación a la biología*. 5ta ed. Ed. Panamericana.

Francisco. M. (2005). *Agua y Agronomía*. Aedos.

García. P. M. (2008). Jornadas sobre “*Ambiente y Riegos: Modernización y Ambientalidad*”. Recuperado de <http://ceer.isa.utl.pt/cyted/2008/guatemala/cursos/Curso5-MGarcia.pdf>.

Gates, D.M. (1990). Physical and physiological properties of plants. In: National Research Council. *Remote sensing with special reference to agriculture and forestry*. Washington D.C. National Academic of Sciences.

Gausman, H.W. (1974). *Leaf reflectance near infrared*. *Photogrammetric Engineering and remote Sensing*.

Hecht.Z. (2002). *Optica*. Cuarta Edición. Addison-Wesley Iberoamericana.

- IdelSur, 2014. <http://www.idelsur.com/destacados.php>
- Kirkham, M.B. (2005). *Principles de soil and plant relations*. Elsevier academic press.
- Kramer, P.J. (1983). *Water Relations of Plants*. Academic Press: New York. Reprinted by permission of Academic Press.
- Kramer, P.J. and J. S. Booyer. (1995). *Water relations of plants and soils*. Academic press. NewYork,N. Y.
- Kurt C. Rollee. *Termodinámica*. Prentice Hall. México, 2006.
- Larcher, W. (1995). *Phycological Plant Ecology*. Ecophycology and stress phycology of functional groups. Translated by J. Weiser. Spronger. Berlin. Third edition. 506 p.
- Legrandjacques, J-C Krapez, F Lepoutre, D Balageas. (1998) *Nothing but the crack: a new kind of photothermal camera*, Proc. of the 7th European Conference on Non Destructive Testing, Copenhagen, Denmark, pp 2651-2657.
- Lincoln Taiz y Eduardo Zeiger. (2006). *Fisiología vegetal*. Castello de la plata. Publicaciones de la Universitat Jaume I.
- Martínez P, Emma (2008). *Estudio de las propiedades hídricas del suelo mediante medidores de actividad de agua*. USC.
- Meaden, G.J.; Kapetsky, J.M (1992). *Los sistemas de información geográfica y la telepercepción en la pesca continental y la acuicultura*. FAO Documento técnico de pesca. N 318. Roma, FAO.
- Milton, E. J. (1987). *Principles of field spectroscopy*. *International Journal of Remote Sensing*. Taylor and Francis. England, 2009.
- Milton, E. J, (1995). *Advances in field spectroscopy*. *Advances in Environmental Remote Sensing*. F. M. Danson y S. E. Plummer. Chichester, John Wiley: 9-32.
- Mosqueira, S. 1(971). *Física General*. Decima quinta Edición. Patria. México.
- Mutha, P. A (1982). *Detection and Analysis of vegetation stress*. In: Johannsen, C. J. and Sanders, J. L. (1982). *Remote sensing for resourse menagement*. Soil Conservation Society of America.
- Neumann, H.H., and G.W. Thurtell (1972). *A Peltier cooled thermocouple dewpoint hygrometer for in situ measurement of water potentials*. In *Psychrometry in Water Relations Research*, R.W. Brown and B.P. van Haveren, eds., Utah Agricultural Experiment Station: Logan, Utah. Reprinted by permission of the Utah Agricultural Experiment Station.)
- Schaum, D. (1961). *Theory and Problems of College Physics*. 6th ed. Schaum: New York.

Shortley, G., and Williams, D. (1971). *Elements of Physics*. 5th Ed. Prentice-Hall: Englewood Cliffs, New Jersey.

Ormeño. (1991). *Fundamentos Físicos de la Teledetección*. E.U.I.T. Topografía. Madrid.

Scholander, P. F.; Bradstreet, E. D.; HEMMINGSEN, E.A.; HAMMEL, H. T. (1965). *Sap Pressure in Vascular Plants, Negative hydrostatic pressure can be measured in plants*. *Science* 148(3668), 339 - 346.

Soria R. J; Ortiz S. C.A; Islas G. F y V. Volke H. (1998). *Sensores remotos. Principios y aplicaciones en la evaluación de los recursos naturales*. Publicaciones Especial 7. Sociedad Mexicana del Suelo. Chapingo, México.

Testo AG, (2008). *Termografía guía de bolsillo*. Recuperado de [http://www.testosites.de/export/sites/default/thermalimaging/es\\_ES/local\\_downloads/testo\\_thermalimager\\_pocketguide.pdf](http://www.testosites.de/export/sites/default/thermalimaging/es_ES/local_downloads/testo_thermalimager_pocketguide.pdf)

Vaughan, P. (2001), *Estimación de contenido de humedad de la vegetación mediante espectro-radiometría*, Tesis Doctoral Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares, España.

WILLIAMS, L.E.; ARAUJO, F.J. 2002. *Correlations among predawn leaf, midday leaf and midday stem water potential and their correlations with other measures of soil and plant water status in Vitis vinifera*. *Journal of American Society for Horticultural Science*, 127 (3), 448-454.

Zabalegui, J. (2011). *Evaluación de Métodos de estimación del estado hídrico de la variedad de vid tempranillo para la toma de decisiones de riego*. Tesis de licenciatura no publicada. Universidad pública de Navarra, Navarra, España.