

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

DETECCION DE EFECTOS DE SALES DE CROMO EN

LACTUCA SATIVA POR MEDIO DE FOTOGRAFIA

MULTIESPECTRAL

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE LICENCIADO

EN BIOLOGIA PRESENTA

MARTHA MARIA DE LOURDES SANCHEZ SOLIS

MEXICO D.F.

MARZO 1983



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

CONTENIDO

Resumen :	
Capítulo I. Antecedentes	1
Capítulo II. Efectos del Cromo en los Organismos	4
Capítulo III. Relaciones entre la Radiación Electromagnética y la Vegetación	10
Capítulo IV. Principios Radiométricos	14
Capítulo V. Material y Métodos	22
Capítulo VI. Discusión y Conclusiones	27
Referencias.	33

ANTECEDENTES

Muchos contaminantes ponen en peligro la salud tanto humana como del medio ambiente, ocasionando daños inmediatos o a largo plazo, por ej. cáncer y daños genéticos. En el caso de la agricultura se sufren pérdidas económicas debido al impacto directo de los contaminantes sobre las cosechas y a la subsecuente degradación del suelo.

Los contaminantes pueden provocar un cambio en el equilibrio de nutrientes y puesto que estos intervienen en procesos que controlan, por diferentes vías, la pigmentación típica de la planta, se puede esperar que dichas sustancias tengan efecto sobre la pigmentación. El verde de la clorofila es una característica observable de los ecosistemas (bosques, campos cultivados, fitoplancton, etc) que están relacionados con productividad.

Como consecuencia del proceso de contaminación las propiedades ópticas de los organismos se ven alteradas en las regiones del visible e infrarrojo del espectro electromagnético (EEM). Este hecho es ya bien reconocido y muchos investigadores se han avocado a la tarea de relacionar cambios en la reflectancia espectral de la vegetación con cambios fisiológicos, que incluyen disminución en la concentración de la clorofila, cambios en la estructura celular y disminución en la concentración de agua en los tejidos en presencia de elevadas concentraciones de elementos traza (Pb, Cu, Zn). Se ha investigado también la utilidad de medidas de reflectancia en la clasificación de la severidad de enfermedades en vegetación usando funciones simples para esto (Lathrop, 1980).

El enfoque tradicional en la detección de enfermedades por medio de parámetros ópticos consiste en suponer que la reflectancia en la banda del infrarrojo cercano está correlacionada con la detección de la severidad (Colwell, 1970), pues las plantas en stress (*)

no sólo cambian su contenido de pigmentos sino también la concentración y distribución del agua a nivel celular. Esto da lugar a que se produzcan fuertes cambios en la reflectancia en el infrarrojo. También en estudios radiométricos se ha vuelto frecuente el uso de combinaciones de bandas espectrales (Tucker, 1979) por ej. rojo/infrarrojo (rojo/IR) para obtener biomasa y estado fisiológico.

Los efectos del "stress" sobre la reflectancia espectral de las hojas han sido descritos por diferentes autores (Murcha, 1978; Hilderant, 1973; Tucker et al, 1981). Algunos han estudiado las relaciones entre las propiedades ópticas y el estado de salud de la planta determinado por diferentes métodos. Fuhrer et al (1981) describen el estado de salud con respecto a la necrosis, contenido de clorofila, β -caroteno y actividad de peroxidasa.

Así pues es deseable analizar espectralmente la radiación proveniente de una cubierta vegetal con el fin de determinar cuales áreas reflejan anormalmente. Para cuantificar la radiancia proveniente de la cubierta vegetal es necesario considerar a la hoja como unidad funcional. Sin embargo la reflectancia del conjunto no se manifiesta de manera directa en función de la reflectancia de un elemento. Al interactuar la radiación electromagnética (REM) con la superficie de las hojas, ésta queda sujeta a los procesos de reflexión, absorción y transmisión (ρ , α , τ) que son determinados por las características de la hoja. Además de las propiedades espectrales, la cantidad de radiación que es reflejada en una dirección por una cubierta vegetal depende del ángulo de incidencia de la radiación, de la reflectancia del suelo y de la densidad de la cubierta en sus distintos estratos. Para calcular la reflectancia de una cubierta es necesario modelar la interacción de la radiación a partir de los elementos que la componen.

Suits (1971) desarrolló un modelo, el cual predice las propiedades de reflectancia bidireccional con base en los componentes de

la cubierta . Este modelo consiste en suponer un número de capas ex tendidas horizontalmente. Dentro de cada capa, se modelan cada uno de los estratos de la vegetación incluido el suelo.

La intensidad con que los objetos reflejan la radiación puede ser registrada de diferentes formas. Mediante el procesamiento de esta información se puede tener una curva típica de comportamiento espectral (denominada firma espectral) y usarla después para comparación con zonas alteradas. Vincent (1982) analizando la vegetación en las bandas verde e IR localizó zonas asociadas a rocas con alteraciones hidrotermales y rocas con altas concentraciones de óxidos. Kamlish et al (1982) lograron relacionar el daño en la vegetación con altas concentraciones de cromita y periodotita.

(*) La palabra "stress" no tiene traducción al español. Empezó a usarse en trabajos de sicología y su uso se ha extendido al area de biología. Su significado en esta area es la de una condición que de alguna manera limita el desarrollo de los organismos. Esta palabra debe ser escrita entre comillas.

EFFECTOS DEL CROMO EN LOS ORGANISMOS

Los nutrientes requeridos por las plantas pueden ser agrupados en dos categorías: aquellos que son esenciales en cantidades proporcionalmente grandes o macronutrientes y los que se necesitan en pequeñas dosis o micronutrientes. Algunos elementos parecen ser más adecuados para construir las moléculas que forman los organismos. Se ha encontrado que solamente veintisiete de los noventa elementos químicos naturales encontrados en la corteza terrestre son componentes esenciales en muchos organismos. (Lehninger, 1975). Tablas 1 y 2.

Todas las plantas tienen unas condiciones de nutrientes requeridos que es óptima, esto no es estático, hay evidencia de que los organismos presentan tolerancias variables de acuerdo con las condiciones del medio, a diferentes parámetros. En experimentos de invernadero donde un mayor número de condiciones son controladas, las plantas toleran en mayor proporción el factor que les está siendo adverso. Aunque en la naturaleza pocos factores son óptimos, esto no significa que los experimentos realizados bajo condiciones controladas carezcan de validez, sino que se debe tener cuidado al extrapolar los resultados.

Para que una sustancia pueda afectar a un organismo, debe ser asequible a éste, ya sea en solución acuosa como gas o sólido. La concentración de un elemento tóxico no es relevante para una estimación adecuada de su toxicidad a menos que se compruebe su presencia en la forma química dañina. Así un elemento al formar un compuesto puede funcionar como nutriente esencial y con otra configuración ser un elemento limitante al desarrollo del organismo. (Gough, L.P. 1979). El efecto de la toxicidad también depende de la dosis, la frecuencia y la duración de su administración.

El cromo es el elemento no. 24 de la tabla periódica, posee

Tabla 1. Los elementos biológicos

Los elementos citados a continuación son esenciales en la nutrición de una o más especies, pero no necesariamente esenciales a todos los organismos.

Elementos de la materia orgánica	Elementos traza			Iones monoatómicos
O	Mn	B	Si	Na ⁺
C	Fe	Al	Sn	K ⁺
N	Co	V	Ni	Mg ⁺
H	Cu	Mo	Cr	Ca ⁺
P	Zn	I	F	Cl ⁻
S		Se		

Tabla 2. Abundancia relativa de los principales componentes en la corteza terrestre y en el cuerpo humano como porcentaje total del número de átomos.

Corteza		Cuerpo humano	
O	47.00	H	63.00
Si	28.00	O	25.50
Al	7.90	C	9.50
Fe	4.50	N	1.40
Ca	3.50	Ca	0.31
Na	2.50	P	0.22
K	2.50	Cl	0.08
Mg	2.20	K	0.06
Ti	0.46	S	0.05
H	0.22	Na	0.03
C	0.19	Mg	0.01

dos valencias +3 y +6, trivalente y hexavalente respectivamente y se encuentra en el grupo VI de los elementos de transición que también contiene al molibdeno y al tungsteno. El cromo se presenta como un metal duro y lustroso que cristaliza en el sistema cúbico. En la naturaleza se encuentra principalmente como cromita, $\text{Fe}:\text{Cr}_2\text{O}_3$. La relación de Fe a Cr_2O_3 varía de, 42 a 56% del primero y 10 a 26% del segundo, conteniendo además cantidades diferentes de magnesio, aluminio y silicio (Weast, 1974).

Industrialmente sus usos más importantes los tiene como ligante en aceros aleados e inoxidables y como recubrimiento anticorrosivo o de piezas de ornato. Los principales compuestos industriales del cromo son: cromato y dicromato de potasio, trióxido de cromo, sulfato básico de cromo y óxido de cromo. Los dicromatos se usan como agentes oxidantes en análisis cuantitativos y en el curtido de pieles.

El cromo se obtiene generalmente por reducción con aluminio; sin embargo para la producción de dicromato de potasio (compuesto de nuestro interés se hace exponiendo la mena a altas temperaturas con bicarbonato de sodio y óxido de calcio en un horno (Hampel A.C., 1973).

Existen suficientes evidencias para considerar al cromo como un micronutriente esencial para mamíferos. Se han encontrado cromo en cantidades muy pequeñas (0.05 a 0.65 μg) en los tejidos de ratas silvestres similares a las halladas en ratas de laboratorio, especialmente en el bazo (Schroeder *et al*, 1975). Cuando la cantidad de cromo disponible es menor de 0.01 ppm se produce dilatación en los vasos y opacidad en la córnea de los ojos (Mertz, 1969). A niveles bajos también se asocia con la falta de tolerancia a la glucosa en ratas (Dimm y Bogliani, 1973) y en monos (Davidson *et al*, 1967). Por otra parte para el ser humano la concentración máxima de cromo permisible como aerosol (Cr_2O_3) es de 0.1 mg/m^3 para una exposición de ocho horas diarias. En los humanos concentraciones altas de sus com-

puestos producen alteraciones orgánicas como rinitis, ulceración nasal, perforación del tabique y bronconeumonía (Gough L.P., 1979). Entre los trabajadores de la industria del cromo la tasa de mortalidad por cáncer pulmonar tiene una proporción entre 7.1 y 28 veces mayor que entre otras industrias de la transformación (Brinton, 1952; Sullivan, 1959). Se ha determinado que el cromo derivado de las plantas es un importante componente de la dieta animal comparado con otras fuentes como aire y agua (Lahouti y Peterson, 1979) aunque no se ha comprobado que sea un micronutriente en vegetales Huffman y Allaway, 1973).

La presencia de cromo en altas concentraciones en el suelo es uno de los factores que impiden el desarrollo de vegetales como pastos, tabaco, (Soane y Saunder, 1959), avena (Hunter y Vergnano, 1953), remolacha (Peseck y Kolsky, 1967), estafiate (Vorob'ev y Gudoshnikov, 1967), cebada (Aarkog y Lippert, 1971) y arroz (Nagai, 1971) entre otras plantas. Soane y Saunder (1959) trabajando con avena reportaron que los tratamientos con dicromato de potasio producen severo amarillamiento de las hojas, clorosis, pero no se presentó un patrón de daño específico. Otras plantas a las que estos autores consideran como muy sensibles al cromo son maíz y tabaco, indicando que la detección de bajas concentraciones por análisis químicos es complicada. Ejemplos de este tipo de análisis son la detección de cromo hexavalente por reacción con difenil-carbazona y determinación total de cromo por permanganato y azida y el de hipobromito, alcalino; los tres análisis son cuantificados colorimétricamente (American Pub. Health Assn., 1971). La dificultad radica en que los resultantes químicos de interés pueden ser enmascarados por otros compuestos y/o elementos afectando la lectura colorimétrica.

El cromo hexavalente agregado al suelo permanece móvil solamente si sus concentraciones exceden las capacidades de adsorber y reducir del suelo (Bartlett y Kimble, 1976). Las diferentes concentraciones

nes de cromo halladas en semillas de trigo son indicativas de las condiciones geoquímicas, por lo que pueden ser utilizadas para registrar el contenido del cromo en el suelo para diferentes áreas. En un trabajo llevado cabo en Artemisia austriaca y Stippa lessingiana - fué posible usarlas como indicadores dada la extensión de la población y la concentración del cromo en ellas (Vorob'ev y Gudoshnikov, 1967).

El dicromato de potasio es un compuesto de alta solubilidad en agua por lo que penetra fácilmente vía raíz. Estudios en diferentes plantas mostraron que el cromo hexavalente se acumula en menor proporción que el cromo trivalente en la raíz y transporta cantidades mayores a los tejidos aéreos, aunque para ambos casos los porcentajes de cromo transportados son bajos. La acumulación de cromo hexavalente en hojas y tallos de lechuga en plantas tratadas presenta una proporción de 1:65.29 , hoja/raíz, y 1:101.97 para cromo trivalente (Lahouti y Peterson, 1979)

De manera macroscópica los primeros síntomas de daños por sales son reducción en el crecimiento y necrosis comenzando en la parte marginal de las hojas. Después esta necrosis se dispersa hacia la parte central de la superficie de las hojas (Fuhrer et al, 1981). Los metales pesados en general afectan las funciones estomáticas de las hojas (Bazzaz et al, 1974).

Bioquímicamente el efecto más notorio del exceso de cromo en las plantas es una baja en el nivel de nitrógeno (Hunter y Vergnano, 1953) aunque también se observa un aumento en la concentración de fosfatos. Los niveles altos de proteína en avena están asociados con la capacidad de ciertas variedades a movilizar el nitrógeno.

Se han preparado enzimas de superóxido dismutasa en Pseudomona ovalis sustituidas con Cd, Cr y Mn. Los resultados indican que estos

elementos pueden unirse a la enzima en el sitio que corresponde al Fe aunque las enzimas sustituidas no presentan actividad (Yamakura, 1980). También se han reportado pequeñas cantidades de cromo unidas a proteínas en semillas y hojas. Otros consideran que el cromo está unido predominantemente a proteínas aunque hay poca evidencia para afirmar esto (Lahouti, 1979). Los compuestos de cromo encontrados en semillas de trigo, aunque presentes en concentraciones muy bajas se han reportado biológicamente activos.

RELACIONES ENTRE LA RADIACION ELECTROMAGNETICA

Y LA VEGETACION

En la region de los 400 a los 2500 nm existen tres diferentes comportamientos para la interacción de la energía electromagnética con la vegetación. Estos son determinados por las diferentes características de las hojas. Esta interacción fué primero explicada por Willstätter y Stoll . El desarrollo de esta teoría usando maple blanco (Arciniegundo L.) está basada en la óptica de la geometría interna de la hoja. "La energía solar incidente, normal a la epidermis, pasa a través de las distintas capas celulares de maple albino, y entra al parénquima en empalizada. La radiación pasa a través de esta capa hacia el mesófilo esponjoso. Aquí las células son de redondas a ovoides y existen espacios de aire entre ellos; en ausencia de absorción se produce una dispersión de la radiación en el mesófilo esponjoso resultado de la reflexión con las células, de la refracción debida a las mismas y de los espacios de aire. Esto produce la radiación dispersada que se difunde dentro de la hoja. La otra fracción también es difundida y escapa hacia afuera" (citado por Tucker, 1973).

El comportamiento explicado por estos autores se lleva a cabo a través de tres procesos, absorción, reflexión y transmisión. La forma como se reparte la radiación incidente depende de la longitud de onda y morfología de la hoja. Son cuatro las características de las hojas que determinan en mayor medida los procesos mencionados.

- a) arreglo histológico de los tejidos. Esto da lugar a diferentes grados de la dispersión de la radiación incidente y es función de la longitud de onda.
- b) la concentración y distribución del agua; controla la absorción de energía en el infrarrojo cercano.
- c) concentración, composición y distribución de los pigmentos que in

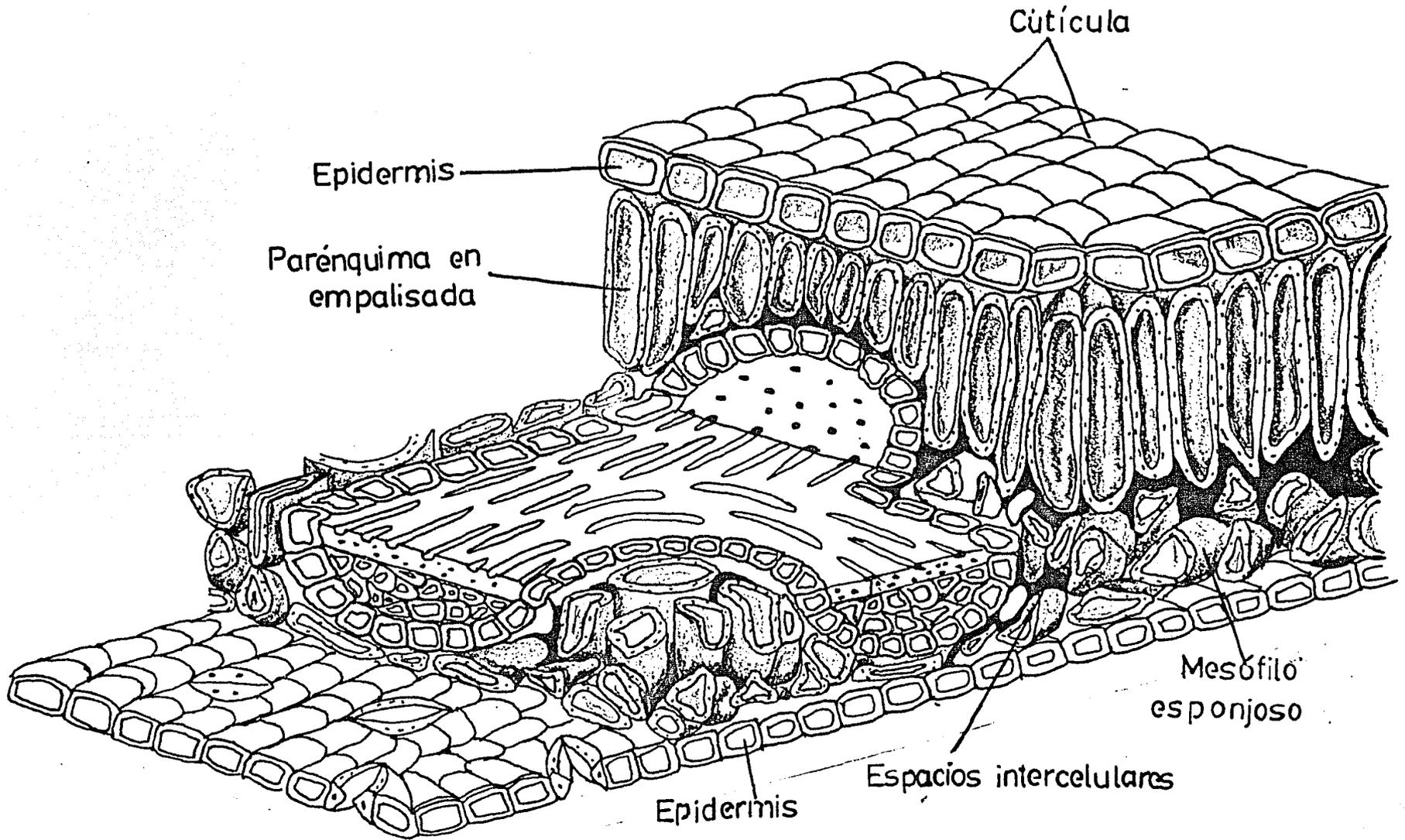


Fig 1. Histología de una hoja típica.

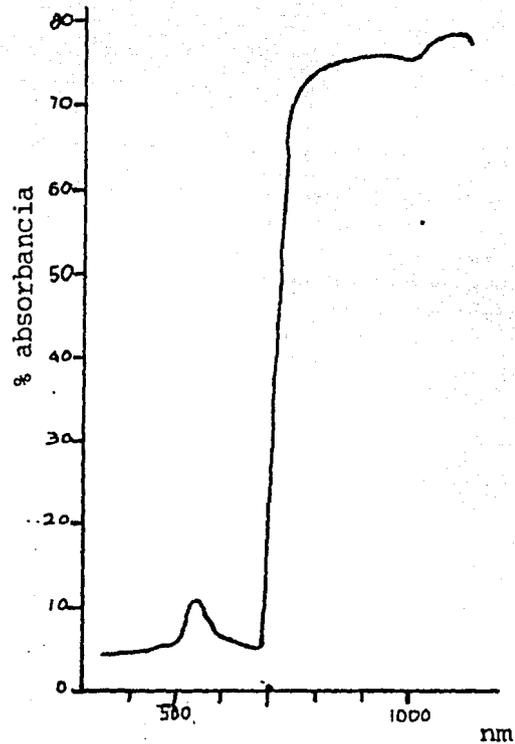
fluyen en la absorción del u.v. y espectro visible.

d) Rugosidad y porosidad de la superficie de la hoja.

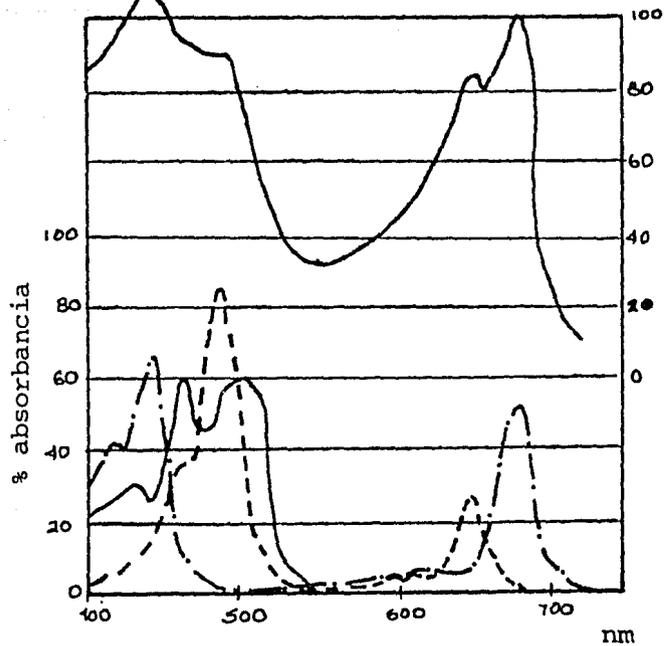
De los 400 a los 700 nm la interacción con la EEM está determinada principalmente por la absorción de los pigmentos. La habilidad de un compuesto para absorber EEM depende de su estructura molecular. El espectro de absorción indica la capacidad de absorber radiación en función de la longitud de onda. Cuando un fotón llega a un átomo o molécula capaz de absorber la radiación de esa longitud de onda, la energía es absorbida por uno de los electrones el cual es elevado a un nivel de energía más alto; el átomo está entonces en un estado excitado. Solamente radiación con longitud de onda específica puede excitar a un átomo o molécula particular. La molécula excitada puede seguir dos posibles caminos: a) emitir espontáneamente en forma de luz, calor o ambas, la energía que había absorbido originalmente.

b) Reaccionar con alguna otra molécula, produciendo una reacción fotoquímica en donde la molécula excitada puede perder un electrón para donarlo a la molécula con que reacciona. Este proceso está asociado con la fotosíntesis y se puede definir como la utilización de la energía luminosa para la biosíntesis de glucosa y consta de dos partes; la primera es la captura de energía luminosa por los pigmentos y su conversión a energía química; esto se conoce como reacciones de luz. La segunda parte se conoce como fase oscura y es donde se produce la glucosa, que es un compuesto de alta energía. La fotosíntesis se efectúa en órganos especiales de las células denominados cloroplastos. Estas son estructuras elipsoidales con una longitud axial de 3 a 5 μ m que contienen el pigmento verde llamado clorofila. El pigmento de cloroplastos en las células de las hojas superiores puede ser de varios cientos. Estas estructuras están constituidas en un sistema laminar, embebido en una estructura base llamada estroma, fig. 1. Además de la clorofila existen otros pigmentos como carotenoides y ficobilinas.

Las plantas superiores poseen dos tipos de clorofila, a y b. La primera se encuentra en una proporción mayor. Las clorofilas están normalmente asociadas a proteínas específicas y pueden ser extraídas de las hojas y aisladas.



Espectro de absorción del agua



Espectro de absorción de clorofila a (en línea continua), de clorofila b (línea discontinua) y carotenoides (línea y puntos).

La clorofila "a" aislada tiene dos picos de absorción fuerte, en 420 y 663 nm, sin embargo en la naturaleza muestra otros picos de absorción, en 670, 678, y 685 nm, fig. 2. Estos picos no son debidos a diferentes formas del compuesto, sino que representan corrimientos espectrales causados por diferentes estados de agregación a proteínas. Dentro de las plantas superiores, la clorofila b, los carotenoides y ficobilinas contribuyen de manera muy limitada al patrón espectral del organismo.

De los 700 a los 1300 nm la interacción de la radiación con la materia vegetal se caracteriza por la casi ausencia de absorbancia y altos valores de transmitancia y reflexión. Con ésto se puede decir que la presencia o ausencia de clorofila influyen poco en la región del infrarrojo cercano. En el infrarrojo, el nivel de reflectancia es más alto que en el espectro visible. El espectro de absorción del extracto de clorofila indica que estos pigmentos son casi transparentes a la radiación infrarroja, fig. 3. Existen trabajos publicados acerca de la absorbancia espectral de las hojas, pero la evidencia más fuerte del patrón de absorbancia está dada por la comparación del espectro de girason, de una hoja verde típica y la otra albina. En el caso de la hoja albina, el nivel de reflectancia en el visible es casi el mismo que en el infrarrojo cercano.

PRINCIPIOS RADIOMETRICOS

La luz que vemos es sólo una pequeña parte del amplio espectro de radiación electromagnética (REM); las diferentes partes del espectro se distinguen al observar diversos intervalos de longitud de onda. En el espectro visible la variación en la longitud de onda da lugar a los cambios del azul al rojo. Al recorrer el espectro de las longitudes de onda mayores a las menores primero se encuentran las llamadas ondas de radio que pueden tener longitud de onda de hasta 500 m. Después siguen las ondas cortas (i.e. micro-ondas y ondas de radio), posteriormente las radiaciones en el infrarrojo cercano al lejano donde se encuentra la radiación térmica. Siguen las longitudes de onda del espectro visible y al seguir disminuyendo, están las radiaciones ultravioleta, rayos X y rayos gamma. No existen límites reales entre un tipo de longitud de onda y otro, los valores asociados a los diferentes intervalos son convencionales. (Feynman, 1969).

En el vacío las ondas electromagnéticas se comportan de acuerdo al principio de superposición, el cual establece que en una región donde se cruzan dos ondas se produce una cuya amplitud es la suma de la longitud de cada una de las originales. Este principio es la base para el análisis de movimientos ondulatorios.

La distribución espectral de la radiación reflejada después de interactuar con la materia está determinada por la superposición de las longitudes de onda individuales reflejadas. Cada componente de la radiación incidente es además absorbido y transmitido en diversas proporciones; en casos en que la banda de observación esté en el IR térmico, la radiación absorbida es emitida de acuerdo a la emisividad espectral del cuerpo. Estos procesos determinan la respuesta espectral de ese material.

Para registrar esta REM reflejada o emitida por los objetos se

han diseñado diferentes tipos de sensores; los más comunes son los que a continuación se enumeran. Reeves R., A. Anson, D. Landau, 1976)

- a) Barredores con fotomultiplicadores; registran la radiación natural incidente, pueden recorrer de radiación U.V. a radiación en el IR cercano.
- b) Cámaras
 - i) Usando película convencional de blanco y negro con diferentes filtros; operan de los 400 a los 700 nm.
 - ii) Con película IR de blanco y negro y filtros apropiados. Registran de 600 a 900 nm.
 - iii) Sistemas multicámaras; cada cámara registra una banda y pueden en conjunto, detectar radiación de 300 a 900 nm.
- c) Radiómetros de IR. Generalmente miden la radiación total de alguna banda en el IR. Estas imágenes se pueden obtener también por medio de barrido. (1300 a 2500 nm).
- d) Fotómetros. Miden el flujo luminoso en varias bandas de la región óptica. (400 a 700 nm).
- e) Espectrómetros. datos de bandas angostas de manera secuencial. En cualquier región espectral.
- f) Detectores de estado sólido. Un sólo elemento detector usado en radiómetros tipo barredor (10^3 a 10^6 nm).

Una cámara fotográfica usada con las consideraciones radiométricas apropiadas es un sensor de bajo costo. Con una combinación adecuada de película y filtros pueden simularse tres de las cuatro bandas de los satélites Landsat; que son banda 4 registra de 400 a 500 nm, banda 5 de 500 a 600 nm, banda 6 de 600 a 700 nm esto es los registros de las tres primeras son en el visible. La cuarta banda o la banda 7 va de los 800 a los 110 nm que espectralmente corresponde a la región del infrarrojo cercano. La cámara tiene además la ventaja de ser de fácil manejo y transportación para trabajo de campo. Para obtener cuantitativamente el valor de la radiación reflejada de los

objetos en la escena debe conocerse la relación que existe entre el flujo, ϕ , que sale de un objeto de radiancia L , y la exposición resultante en la película. Esta relación se obtiene por medio de la densidad que resulta en el negativo y que es equivalente al número de granos de plata revelados. Cualitativamente y con algunas restricciones, se puede decir que los objetos de mayor densidad óptica en la película (los más oscuros) corresponden a los que mayor radiación reflejaron. Suponiendo un buen procedimiento de revelado, se pueden encontrar contradicciones a lo anterior debido principalmente al efecto de coseno cuarto, el cual se discutirá más adelante.

La respuesta de los detectores a las diferentes longitudes de onda que reciben se define como un cambio en la señal obtenida entre el cambio de flujo incidente, esto es:

$$R_{\text{banda}} = \frac{\Delta S \text{ (salida)}}{\Delta \phi \text{ (entrada)}}$$

R = respuesta en la banda
S = señal en la banda
= flujo

Si su respuesta es lineal la señal obtenida se puede expresar como:

$$S_{\lambda} = R_{\lambda} \phi_{\lambda}$$

Una suposición importante que se hace al tratar con detectores es que es válido el principio de superposición, para un flujo incidente en un intervalo espectral (ancho de banda). Entonces, la señal obtenida en un ancho de banda es la suma de las señales debidas a cada longitud de onda comprendida en esa banda,

$$S_c = S_{\lambda 1} + S_{\lambda 2} + S_{\lambda 3} \dots \dots \dots + S_{\lambda n}$$

Sin embargo no existen radiómetros de respuesta perfectamente lineal ni tampoco el radiómetro ideal, la respuesta real y la respuesta de

un radiómetro ideal se muestran en la fig. 4.

Para tratar a los radiómetros reales en términos de un radiómetro ideal, es convencional llevar a cabo un proceso de normalización. Conceptualmente se determina un rectángulo que representa una respuesta de escalón, de manera que el área bajo ese rectángulo sea igual al área bajo la curva real. Esto es si

$$S_1 = R_{\text{pico}} \phi(\lambda_1 \text{ a } \lambda_2) \quad (1)$$

$$\text{y } S_2 = \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} R \lambda \, d\lambda \quad (2)$$

$$\text{se pide que } S_1 = S_2 \quad (3)$$

S_1 = señal de la respuesta en escalón

S_2 = área bajo la curva de la respuesta real

La longitud de onda, λ_c , alrededor de la cual queda centrado el rectángulo, así como su ancho de banda, $\Delta\lambda$, quedan determinados mediante un proceso de normalización. Una consecuencia inherente a la captación de radiación en un ancho de banda es que dada la señal no se puede determinar cual fué el flujo recibido en cada longitud de onda, sino únicamente el flujo total recibido en esa banda.

La normalización más comunmente usada es la llamada al pico de respuesta o sea al valor de máxima respuesta del radiómetro, aunque se puede normalizar con respecto a cualquier otro valor.

De la ecuación (3), conociendo la respuesta máxima del radiómetro (altura) se busca la base del rectángulo

$$\Delta\lambda = \frac{1}{R_P} \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} R \lambda \, d\lambda \quad (4)$$

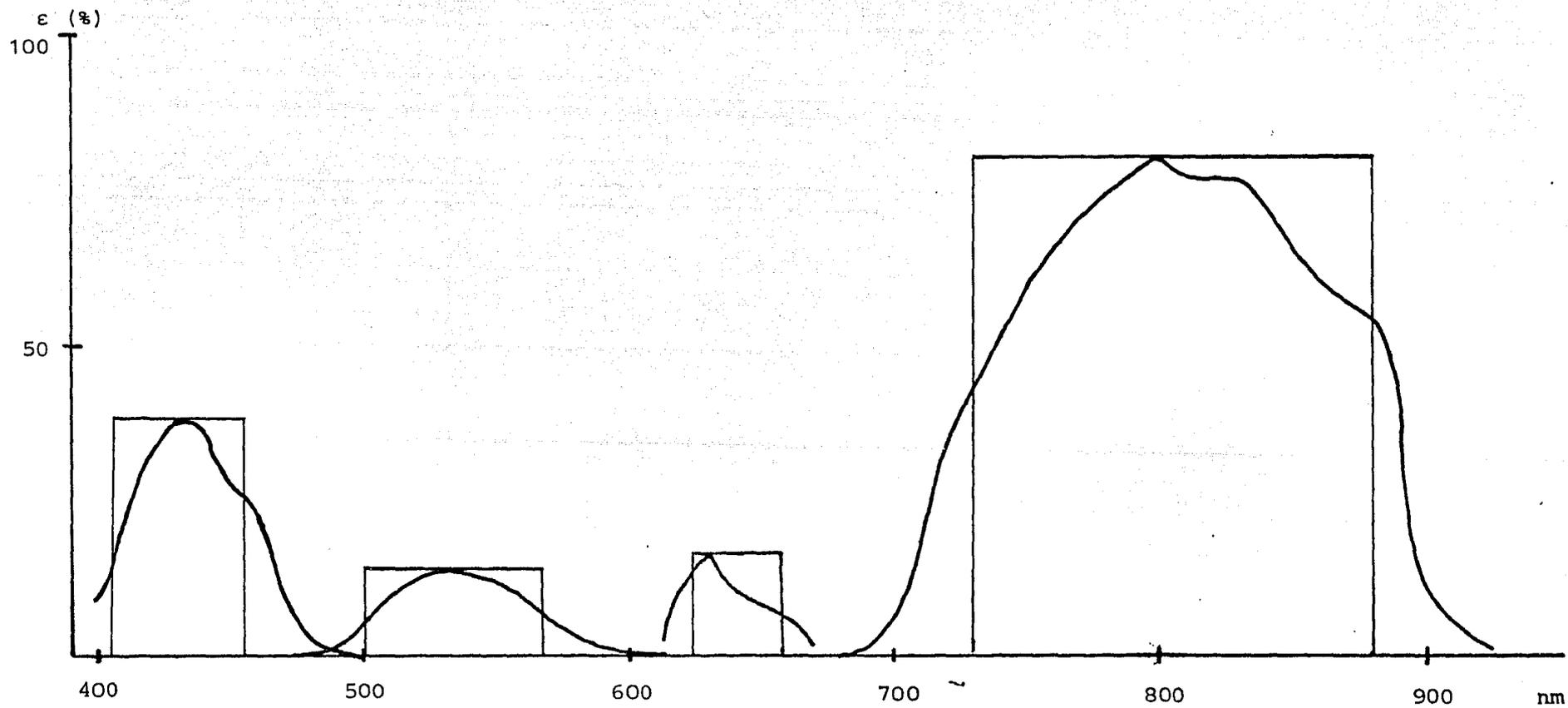


Fig Respuesta del radiómetro real (línea gruesa) y del radiómetro ideal (línea delgada)

El siguiente paso es determinar alrededor de que longitud de onda está centrada esta curva de respuesta espectral equivalente. El valor de la longitud de onda central es función de R_λ de la siguiente manera:

$$R_p \Delta\lambda \lambda_c = \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} \lambda R_\lambda d\lambda \quad (5)$$

$$\lambda_c = \frac{1}{R_p \Delta\lambda} \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} \lambda R_\lambda d\lambda \quad (6)$$

finalmente la banda de operación, $\Delta\lambda$, queda determinada como:

$$\Delta\lambda_{\text{banda}} = \lambda_c \pm \frac{\Delta\lambda}{2} \quad (7)$$

Para usar la cámara como un radiómetro que produzca resultados cuantitativos se determina la respuesta de cada combinación película filtro y es necesario establecer la relación entre la radiación reflejada por un objeto y la densidad sobre la película en el espacio correspondiente a la imagen.

Considerando un elemento de área, dA_o , de radiancia L , en una banda de operación y usando una cámara cuyo eje óptico forma un ángulo β con respecto a la vertical de la superficie, fig. 5, el flujo radiante, $d\phi$, que llega a través del sistema óptico a la película se expresa como:

$$d\phi = L_\lambda (dA_o \cos\theta) \frac{\pi}{4} \frac{\cos^2 \alpha}{R^2} \tau_o \quad (8)$$

donde: L = radiancia

$\cos dA_o$ = proyección del área del objeto.

$\frac{\cos^2 \alpha}{4R^2} D^2$ = ángulo sólido proyectado subtendido por la lente.

τ_o = transmitancia de la óptica

Esta ecuación relaciona el flujo incidente sobre un elemento de a rea en la película con la radiancia del objeto de interés. Sin embargo ha quedado expresada en términos de A_o , $\cos\theta$, y R que son parámetros difíciles de determinar. Es deseable y posible expresar la relación anterior, en términos de parámetros cuya determinación sea local, es decir en la cámara.

Con base en la geometría de la figura 5 y tomando en cuenta los triángulos semejantes.

$$\frac{dA_o \cos \theta}{R^2} = \frac{dA_I \cos \alpha}{f^2 / \cos^2 \alpha}$$

$$= dA_I \frac{\cos^3 \alpha}{f^2} \quad (9)$$

El $\cos^2 \alpha$ divide a f^2 pues la distancia viajada por la radiación hasta dA_I es mayor que f por un factor de $1/\cos \alpha$.

Sustituyendo la expresión anterior en la ecuación de flujo radiante que llega a la película en la banda de operación se tiene:

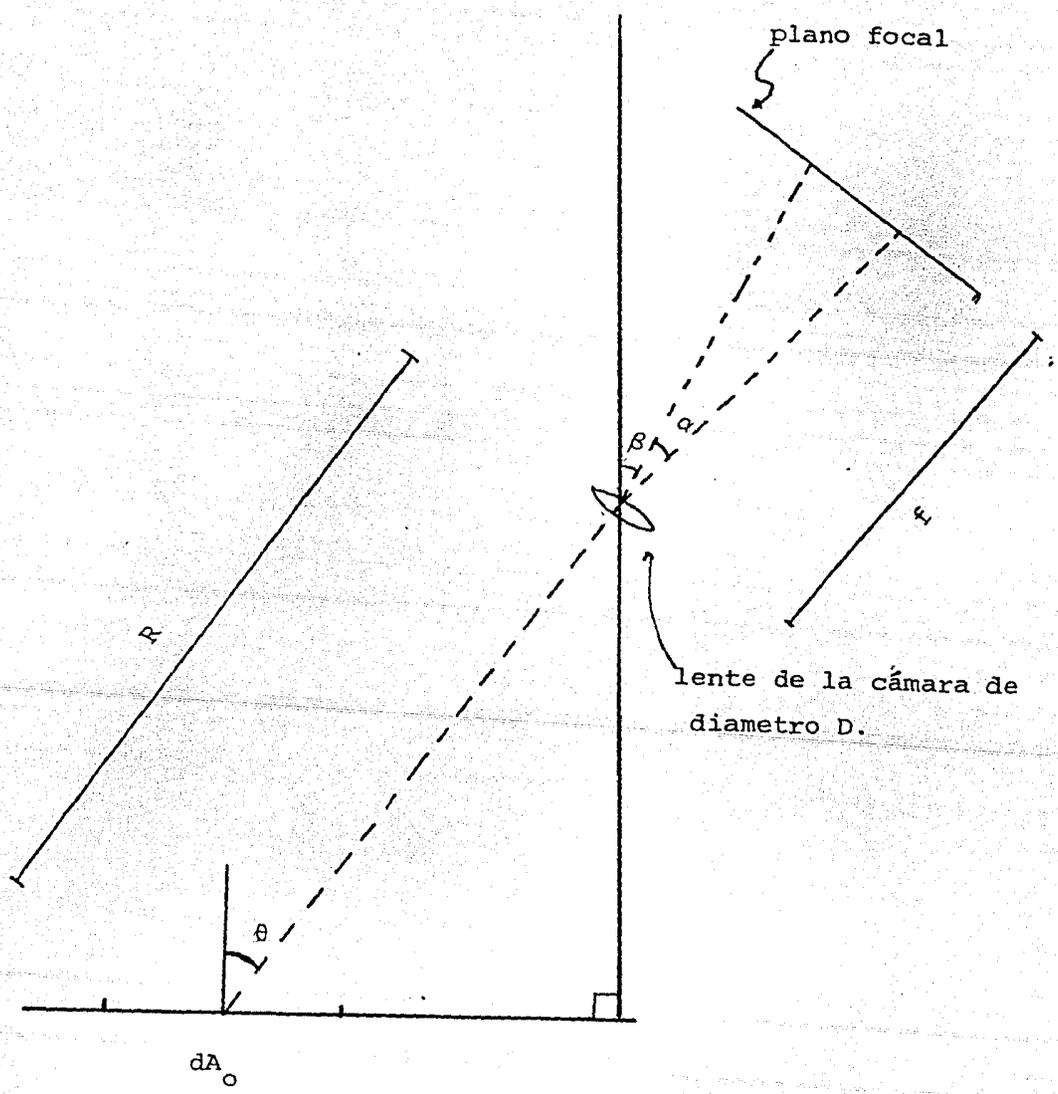
$$d\phi = L dA_I \cos^4 \alpha (D/f)^2 \frac{\pi}{4} \quad (10)$$

$$\frac{D}{f} = \frac{1}{N}$$

$N = \text{no. } f \text{ de la lente}$

En esta ecuación es aparente el efecto del coseno cuarto del ángulo. El efecto es puramente geométrico y tiene como resultado la disminución de la cantidad de radiación que llega a la película. En todo trabajo en el que se quiera usar fotografía en forma cuantitativa, habrá que corregir por este factor.

Lo único desconocido en esta ecuación es L , que es lo que se busca. Para una superficie Lambertiana la radiancia puede relacionar



Esquema de formación de imágenes

se con la reflectancia del objeto de la siguiente manera:

$$\rho_{\text{banda}} = \frac{L(\text{banda})}{E_0(\text{banda})} \quad (11)$$

ρ = reflectancia

donde $E_0(\text{banda})$ es la irradiancia en la banda de operación sobre el objeto. Falta aún, establecer la relación entre $L(\text{banda})$ y la densidad de la película o densidad óptica (d.o.) que produce sobre el negativo. Esto se verá más adelante.

Ya sea que la película se use sin filtro o con él para limitar la banda de operación, a mayor cantidad de radiación recibida se tiene mayor densidad óptica sobre el negativo. Esto pasa hasta llegar a un máximo de densidad en que ya no incrementa al aumentar la radiación incidente, salvo en el caso de solarización. Es por esto que se hace necesaria una calibración de la película con el interés de relacionar la densidad óptica con la radiación recibida. Lo anterior se logra estableciendo la curva sensitométrica para la combinación película filtro usada.

Una curva sensitométrica se puede obtener haciendo incidir una cantidad de radiación conocida sobre la película; se va aumentando la radiación por un factor conocido y se mide la d.o. El proceso se repite por lo menos para ocho valores de exposición (Kodak M-28) y se grafica la densidad contra log de la exposición donde:

$$H_{\text{banda}} = E_{\text{banda}} \cdot t \quad (12)$$

H = exposición

E = irradiancia

t = tiempo

Una gráfica típica tiene una forma sigmoidal. Existe una región en la que el cambio de densidad óptica es directamente proporcional

al cambio en el $\log H/H_0$ (H_0 es la exposición de referencia). La constante de proporcionalidad es igual a la pendiente de la parte recta de la gráfica y se denomina gamma (γ).

$$\gamma = D / (\log H - \log H_0)$$

$$D = \gamma \log H/H_0 \quad (13)$$

Como la densidad y transmitancia del negativo están relacionados de la siguiente manera

$$D = \gamma \log 1/\tau$$

$$\text{entonces } 1/\tau = (H/H_0)^\gamma \quad (14)$$

donde depende de la película y las condiciones de revelado.

Una manera de obtener una curva sensitométrica con una sola exposición y sin necesidad de variar la irradiancia incidente, es usando una escala de niveles de gris. Dicha escala tiene paneles que van desde el negro hasta el blanco y es posible medir en el laboratorio la reflectancia de cada uno de ellos. La irradiancia sobre la imagen proveniente de cada muestra es proporcional a la reflectancia del cuadro correspondiente. Así es posible tener la relación exacta de la radiación que llegó a la imagen de un panel respecto a cualquiera de los demás. Se toma como referencia uno de los paneles (generalmente el de más alta reflectancia) y se tiene que:

$$\begin{aligned} D &= \gamma \log H/H_0 \\ &= \gamma \log E \cdot t / E_0 \cdot t \\ &= \gamma \log E/E_0 \end{aligned} \quad (15)$$

De las ecuaciones (10) y (11) y tomando en cuenta que la irradiancia sobre la película se puede expresar como

$$E = d\psi/dA_I \quad (16)$$

entonces

$$E_{\text{inc pel}} = \frac{\cos^4 \alpha}{N} \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} \tau_o(\lambda) E(\lambda) \rho(\lambda) d\lambda \quad (17)$$

el valor de la integral para un ancho de banda puede representarse por una constante k , ya que

$$E_{\text{inc pel}} = \frac{\cos^4 \alpha}{N^2} \tau_o(\text{banda}) \cdot E_o(\text{banda}) \cdot \rho(\text{banda})$$

$$E_{\text{pel}} = \rho(\text{banda})k \quad (18)$$

Para el mismo negativo la irradiancia correspondiente al cuadro de referencia se expresa como

$$E_o = \rho_o k \quad (19)$$

así que de (15) también se obtiene que

$$D = \gamma \log \rho/\rho_o \quad (20)$$

METODOLOGIA

La estructuración del trabajo del laboratorio estuvo dividida en dos partes: primero la parte correspondiente al cultivo de las plantas en un medio hidropónico contaminado. Durante el desarrollo de éstas se tomó fotografía de ellas en las bandas del azul, verde, rojo, e IR; a intervalos de 84 horas. Esto se hizo tres veces.

Obtenida la fotografía los rollos se revelaron bajo las mismas condiciones para evitar la alteración de los resultados debido a factores externos. Además se fotografiaron nueve paneles de reflectancia conocida. Concluido lo anterior se mide la densidad óptica de los negativos en microdensitómetro digital. A las medidas obtenidas se les hace la corrección de coseno cuarto y con esto con base en los patrones de referencia se construye las curvas correspondientes, Densidad en función del \log / I_0 , a partir de esta curva con la densidad obtenida de las fotografías en las plantas se obtiene la reflectancia de las hojas de lechuga correspondiente a cada concentración de dicromato aplicado.

Las razones por las que se eligió la lechuga como sujeto de experimentación son:

- a) Tiene hoja grande.
- b) Su hoja no es brillante por lo que los reflejos especulares son poco importantes.
- c) No presenta una superficie excesivamente rugosa
- d) Se cultiva en cualquier época del año.

Se compraron plantas de lechuga crecidas en almácigos, con una talla promedio de 15 cm, Estas plantas habían sido regadas con agua corriente. Considerando a la hoja como unidad experimental, se mantuvieron lotes de siete plantas cada uno. Las plantas fueron mantenidas en un medio hidro-ónico (solución de Hoagland tabla 3) sin conta

inante durante tres días para eliminar los residuos del sustrato en el que venían. Durante este tiempo la solución se cambio cada 24 horas.

Primero se hicieron pruebas para determinar cuanto tiempo sobreviven las plantas en solución de Hoagland (Conger A. 1964). El resultado fué que empiezan a mostrar clorosis a los 18 días. Considerando esto y el hecho de que el cromo es un elemento que entra fácilmente a los organismos la solución se cambiaba cada 84 horas, intervalos a los cuales eran fotografiados.

Todos los lotes recibieron luz natural a través de un cristal durante el verano, en un cuarto con temperatura media de 24°C

La fotografía multiespectral se llevó a cabo de la siguiente manera. Se construyó un dispositivo para iluminar uniformemente a la planta, de acuerdo con el manual Kodak M-28 (1977). Este dispositivo se muestra esquemáticamente en la figura 5. Dos secciones de tela blanca opaca de 50 cm de altura se colocaron en un semicírculo de 50 cm de radio. La cortina se cierra al frente donde se le deja una abertura para colocar la cámara. Los especímenes se colocan al fondo en el centro de este cubículo a la altura de la cámara tal que el eje óptico queda perpendicular al plano que servía de fondo al espécimen. Sobre éste último se colocaron 3 paneles de reflectancia conocida para usarlos como referencia en las conversiones de densidad óptica a reflectancia. La iluminación fué con cuatro lámparas de 150 w con filamento de tungsteno. Se colocaron dos a cada lado, a 45° del eje óptico.

Para relacionar en una forma cuantitativa la exposición con la densidad, es necesario que las densidades de interés caigan en la porción lineal de la curva sensitométrica. Esto implica que se debe de tener control sobre la latitud de densidades.

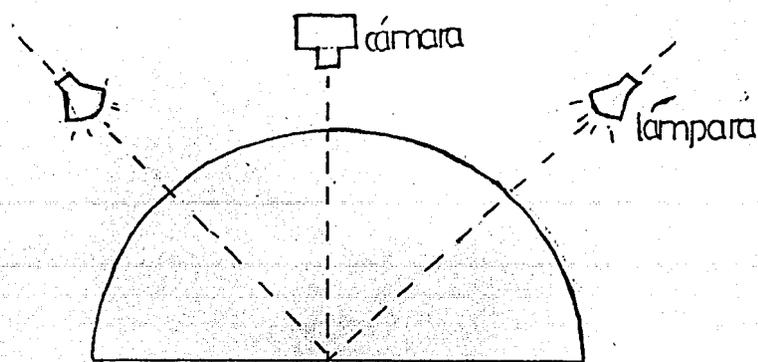
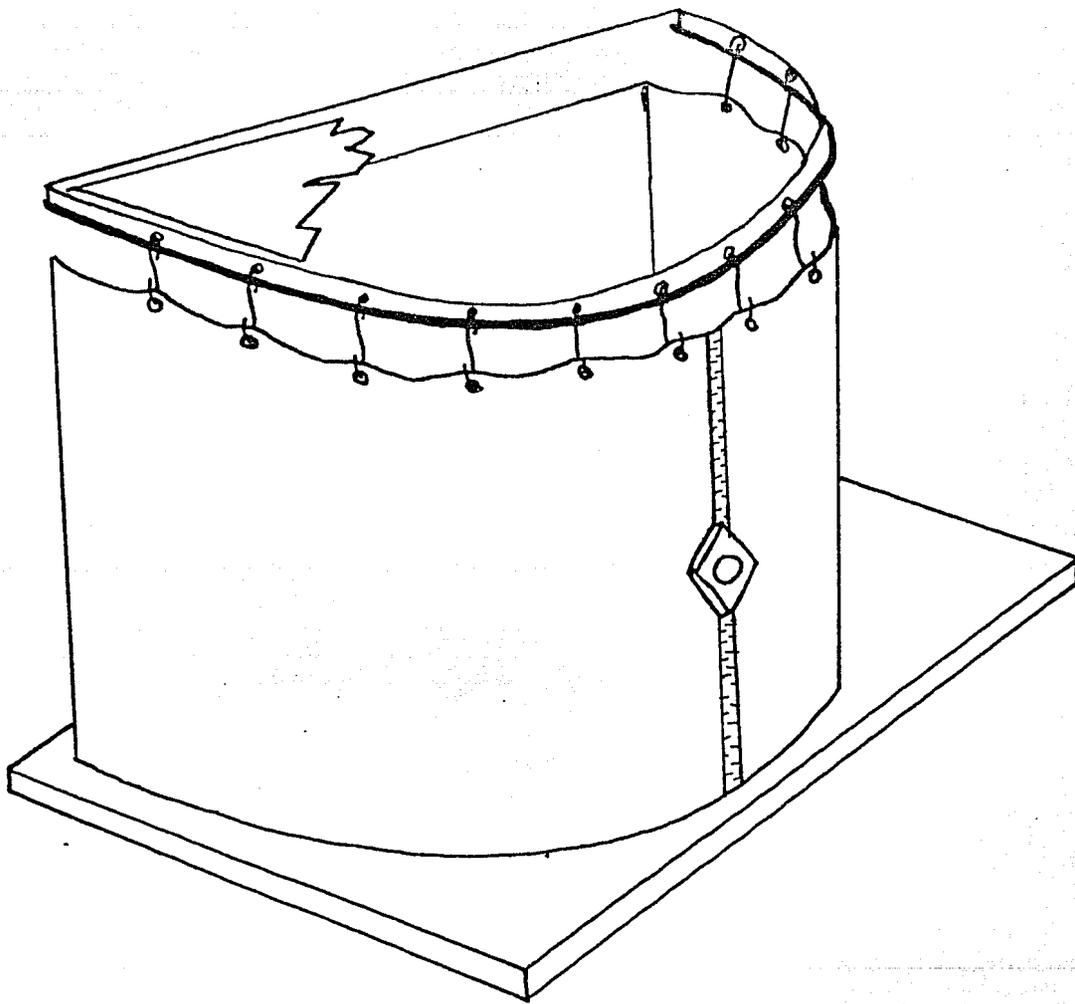


Fig Aparato fotográfico.

Para obtener la misma densidad sobre la película en las diferentes bandas de operación, el tiempo de exposición (a una misma magnitud de irradiancia) es distinto. Esto es porque la sensibilidad de la película no es la misma en todas las longitudes de onda. A la longitud de onda de máxima eficiencia el tiempo de exposición requerido es mínimo. Entonces con respecto a la eficiencia máxima es como se define la sensibilidad de la película.

$$S = \frac{1}{H \lambda / H_0} = H_0 / H \lambda$$

H_0 = exposición de referencia.

H = exposición de la longitud de onda.

Esta función es una medida de la eficiencia de la película.

De la curva de sensibilidad espectral (Kodak, 1973), se busca el máximo de sensibilidad de la curva. Para cualquier otra longitud de onda, la sensibilidad es menor y la eficiencia espectral, se define como:

$$\epsilon_\lambda = S \lambda / S_0$$

S_0 = sensibilidad de referencia

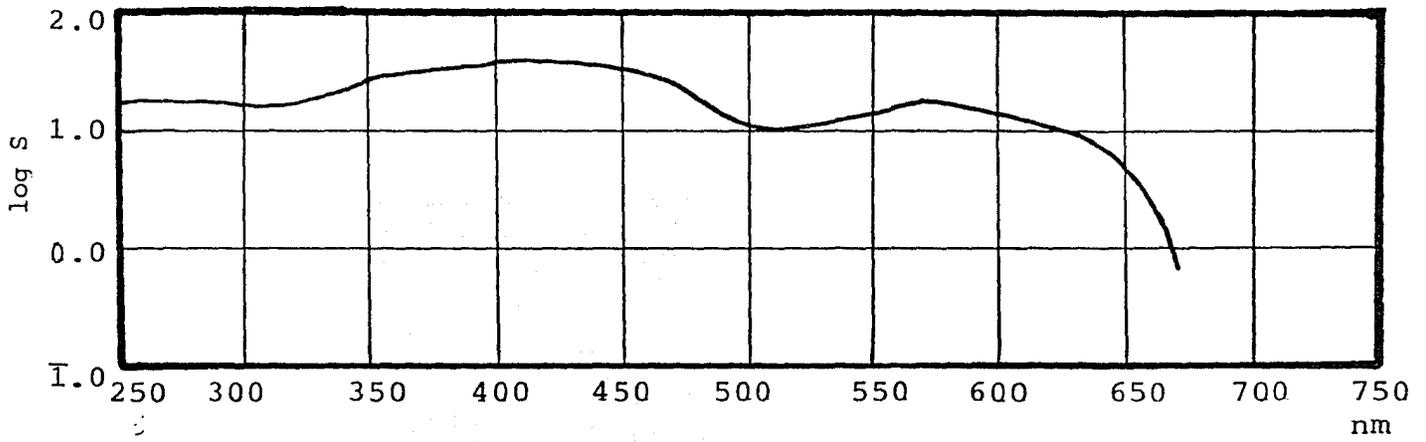
La eficiencia para una banda es

$$\epsilon (\text{banda}) = \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} \epsilon_\lambda d\lambda$$

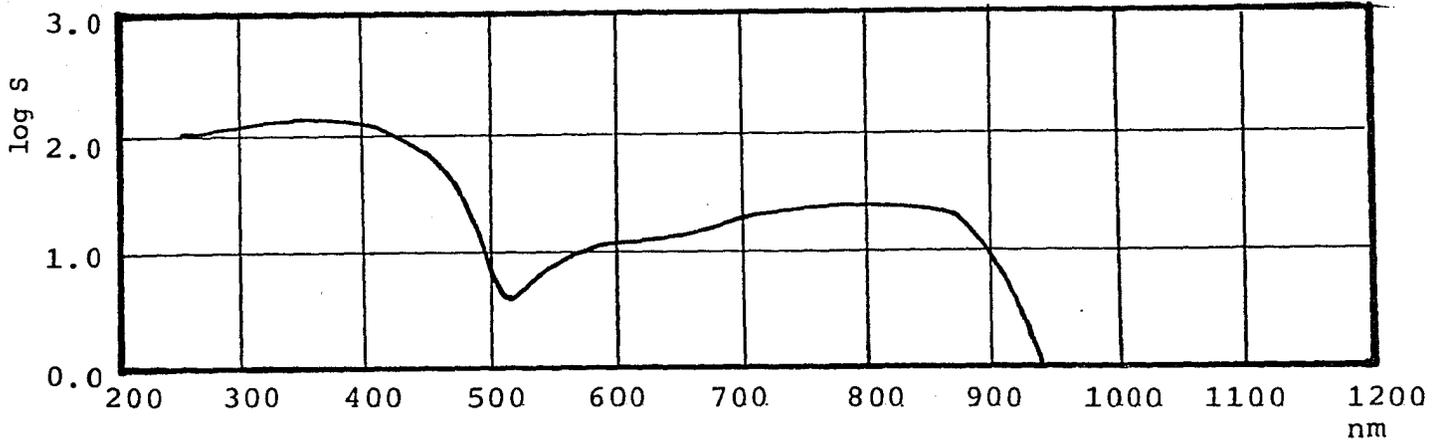
tomando en cuenta la transmitancia de los filtros, obtenida del manual Kodak B-13, para obtener la banda de operación

$$\lambda_c = \frac{1}{R_p \Delta\lambda} \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} \epsilon_\lambda \tau_\lambda d\lambda$$

las combinaciones de película filtro que se usaron se muestran en la tabla 4.



Tri-X



High Speed IR

Fig Respuesta espectral de las películas Tri-X y High Speed IR

Para la calibración de la película se fotografiaron nueve paneles de reflectancia conocida en cada una de las bandas, tabla 6. Estas reflectancias son con respecto al BaSO_4 . En la banda del azul las densidades registradas correspondientes a los paneles fueron bajas. Faltaron paneles de baja reflectancia para establecer completa la curva sensitométrica. Por esta razón se trazaron dos líneas, una como extensión de la parte lineal y otra como un trazo hipotético de como cambiaría de la parte lineal al pie de la curva. Entonces para cada medida de densidad de las plantas tenemos dos valores de reflectancia en esta banda.

Para la banda del verde, rojo e infrarrojo se calculó una curva sensitométrica para cada tiempo de manera que se tuviera la mayor precisión en las reflectancias.

Para la densitometría se utilizó un densitómetro Perkin-Elmer modelo 1010 A. La ventana utilizada fué de $100 \times 200 \mu$. El aparato tiene un error en la medición de .005. Las medidas densitométricas se hacen poniendo la fotografía entre un sistema óptico al que se le hace incidir un haz de luz que atraviesa la película. Después un fotomultiplicador convierte la porción de luz que transmite la película a una señal de voltaje que es amplificada por un convertidor logarítmico cuya salida es D (densidad de la película).

$$D = \log 1/\tau$$

Cada negativo era marcado en el centro con las coordenadas (0, 0) y al medir las densidades se registraban también las coordenadas. Esto con el propósito de hacer la corrección del coseno cuarto.

$$\text{factor de corrección} = \cos^4 (\tan^{-1} d/f)$$

$$D_{\text{real}} = D.m. / \text{factor de corrección}$$

d = distancia al centro del negativo

f = distancia focal

D.m. = densidad medida

Con las medidas ya corregidas se obtienen los valores de $\log \rho / \rho_0$ correspondientes de la curva D vs $\log \rho / \rho_0$. Después se transforman a reflectancia por medio de la siguiente fórmula:

$$D = \log \rho / \rho_0$$

ρ_0 = reflectancia del objeto

ρ = reflectancia de referencia

Puesto que ρ_0 es la reflectancia conocida de un panel, el proceso de relacionar la densidad con la reflectancia queda completo.

Tabla 4. Condiciones Fotográficas

Banda	Revelador	T revelado °C	Filtros (Kodak Wratten)
Azul	HC-110	20	1A y 47B
Verde	HC-110	20	1A y 58
Rojo	HC-110	20	1A y 29
IR	D-19	22	1A y 89B

Tabla 5. Bandas de Operación.

Banda	λ_1	λ_2	$\Delta\lambda$
Azul	405.83	455.43	49.70
Verde	502.82	567.87	65.05
Rojo	624.80	658.86	34.06
IR	729.84	878.71	148.87

Tabla 6. Reflectancia de los paneles en las bandas.

Panel	Azul	Verde	Rojo	IR
G-1	.750	.800	.820	.830
G-3	.690	.700	.690	.674
G-5	.580	.589	.564	
193	.670	.760	.730	
G-10	.260	.238	.208	
198	.131	.145	.128	
199	.130	.126	.117	.110
G-14	.120	.100	.090	
G-16	.090	.075	.070	

RESULTADOS

Concentración	Reflectancia absoluta con respecto al BaSO ₄		
ppm	t ₁	t ₂	t ₃
T	.061	.078	.062
25	.061	.066	.072
60	.058	.067	.057
120	.075	.075	.070
250	.070	.065	.062
360	.065	.065	.072
450	.056	.068	.061
600	.076	.067	.067
750	.072	.063	.076
1250	.065	.057	.067

Concentración	Reflectancia absoluta con respecto al BaSO ₄		
ppm	t ₁	t ₂	t ₃
T	.163	.250	.206
25	.134	.225	.210
60	.131	.218	.179
120	.116	.236	.188
250	.137	.225	.149
360	.125	.204	.240
450	.131	.206	.231
600	.133	.231	.210
750	.133	.213	.215
1250	.175	.236	.240

Concentración ppm	Reflectancia absoluta con respecto al BaSO ₄		
	t ₁	t ₂	t ₃
T	.220	.153	.160
25	.140	.264	.142
60	.171	.281	.136
120	.156	.111	.149
250	.138	.148	.139
360	.207	.253	.126
450	.204	.197	.130
600	.142	.188	.144
750	.142	.230	.149
1250	.172	.148	.139

Concentración ppm	Reflectancia absoluta con respecto al BaSO ₄		
	t ₁	t ₂	t ₃
T	.757	.757	.766
25	.416	.436	.500
60	.446	.601	.512
120	.467	.601	.644
250	.483	.637	.731
360	.512	.682	.706
450	.548	.690	.731
600	.574	.682	.703
750	.478	.682	.675
1250	.456	.483	.474

DISCUSION

El objetivo que en principio se tenía al realizar este trabajo tuvo resultados positivos en el sentido de que sí se observó cambio en la reflectancia al agregar dicromato de potasio en el medio nutritivo.

Otro punto que se observa es el hecho de que la lechuga no es un organismo de alta sensibilidad al contaminante aplicado y su desarrollo fue aparentemente normal ya que ninguna de las concentraciones usadas presenta daño a simple vista. Esto pudiera deberse, según lo que se reporta en la literatura, a que las plantas sensibles al ion $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ son aquéllas que acumulan Fe. Este sería el caso del fíjol (Hunter y Vergnano, 1953).

Los efectos del contaminante fueron observables en tres de las cuatro bandas que se analizaron. En la banda del azul los resultados son muy parecidos para todas las concentraciones en los tres tipos, por lo que de esta banda no fue posible obtener información de los efectos del contaminante (fig. A).

La respuesta de los vegetales a la radiación IR incidente depende de la distribución del agua en los tejidos; si se encuentra dentro de la célula o llenando los espacios intercelulares, espacios de aire.

Si una célula es puesta en una solución hipertónica (mayor concentración de sales en el medio externo), el sistema celular responderá tratando de equilibrar esta diferencia de concentraciones por medio de la salida de agua. Durante este proceso la pared celular mantiene sus dimensiones ya que es una estructura rígida, pero la membrana se contrae al disminuir el volumen celular; este proceso se conoce como plasmólisis. Si las células plasmolizadas permanecen en la solución al alcanzarse el equilibrio de concentraciones volverá a entrar líquido al interior de la célula, de esta manera se recupera el volumen. Este fenómeno se conoce como desplasmólisis (Fig. B).

En la figura C se observa que la reflectancia en la banda del IR para el lote de plantas testigo para los tres tiempos en que las plantas fueron fotografiadas registró valores similares y altos. Esto indica que los espacios intercelulares se encuentran llenos de aire y las células en turgencia como sucede en las plantas sanas. Siguiendo el comportamiento de la figura de menor a mayor concentración de contaminante, se observa que el primer mínimo de la reflectancia se presenta a 25 ppm. Teniendo en cuenta que a mayor concentración de contaminante, la plasmólisis es más rápida, se tiene una desplasmólisis más rápida. La menor concentración será entonces la que más tarde en recuperar el volumen. De esta manera los espacios de aire permanecerán durante más tiempo llenos con agua y por lo tanto la reflectancia es menor. Al irse desplasmolizando las células la cantidad de agua en los espacios intercelulares disminuye y va aumentando la reflectancia. Esto explica la subida de la gráfica en la que aumenta la reflectancia. Después de esta subida hay una parte en la que los valores permanecen aproximadamente constantes. Es en este intervalo de concentraciones en el que las plantas alcanzaron un equilibrio entre la solución y el medio intracelular. En la parte final de la curva hay un nuevo descenso de la reflectancia lo que indica una nueva salida de agua hacia los espacios intercelulares. Como ya se mencionó antes la lechuga no resultó ser un organismo de alta sensibilidad que presente síntomas de desmejoramiento a simple vista, aún a altas concentraciones de $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$, sin embargo el hecho de que no lo observemos no significa que no haya daño fisiológico, que es lo que cabría suponer en esta parte de la curva.

En la figura D se hace una comparación de la reflectancia contra el tiempo para concentraciones constantes. El comportamiento observado muestra lo expuesto anteriormente pues según va pasando el tiempo se incrementa la reflectancia, o sea los espacios de aire vuelven a quedar sin agua.

La banda del verde en plantas sanas tiene una alta reflectancia con respecto a las otras don bandas del espectro visible. Un descen-

so en la reflectancia de esta banda indica una disminución en la cantidad de clorofila presente, ya que este pigmento absorbe en las bandas azul y rojo y refleja en la verde. Hunter y Vergnano (1953) reportan que plantas de alta sensibilidad al dicromato de potasio al ser tratadas presentan clorosis, (amarillamiento de las hojas), lo cual es síntoma de una disminución en la cantidad de clorofila. Es de suponerse que esta disminución es gradual.

Al ir disminuyendo el volumen celular como indica la gráfica en el IR y entrando contaminante a la célula, la concentración del ion aumenta intracelularmente, teniendo una mayor interacción entre el contaminante y los procesos celulares internos que provoca el descenso paulatino en la cantidad de clorofilas.

La figura E muestra que los tres tiempos de medición el mínimo de reflectancia en el verde se presenta con un corrimiento con respecto al mínimo de la banda del IR. Este corrimiento se explica si se considera que es necesario que primero entre el contaminante para que aumente su concentración dentro de la célula y en consecuencia las alteración que produzca sean observables.

Si después de un período de plasmólisis la célula recupera su volumen por medio de la entrada de agua la concentración del ion vuelve a disminuir intracelularmente y las condiciones regresan a ser menos desfavorables lo que implica una recuperación de la célula dando lugar a que la reflectancia aumente como se observa en las gráficas.

Analizando la reflectancia de las plantas a diferentes tiempo de muestreo para cada concentración (fig. F) se observa que la tendencia es mayor reflectancia en el segundo tiempo, intermedia en el tercero y la menor se dá en el primer tiempo de muestreo. Hlavka (1980) en un muestreo multitemporal de plantíos de trigo encontró diferentes firmas espectrales que variaban de acuerdo con el desarrollo de las plantas. Según se van desarrollando, su reflectancia aumenta hasta llegar a un

punto máximo que corresponde a la máxima actividad fotosintética, al ir madurando esta reflectancia disminuye. Esta distribución no es necesariamente simétrica. La distribución de reflectancias en el tiempo en este experimento se comporta de acuerdo con lo anteriormente expuesto. Como la lechuga no resultó ser una planta de alta sensibilidad, su desarrollo no se afectó en una forma definitiva, que lo lleve a la senescencia. Entonces los registros de t_1 antes de la mayor eficiencia fotosintética, t_2 está alrededor de este punto y t_3 después de esto.

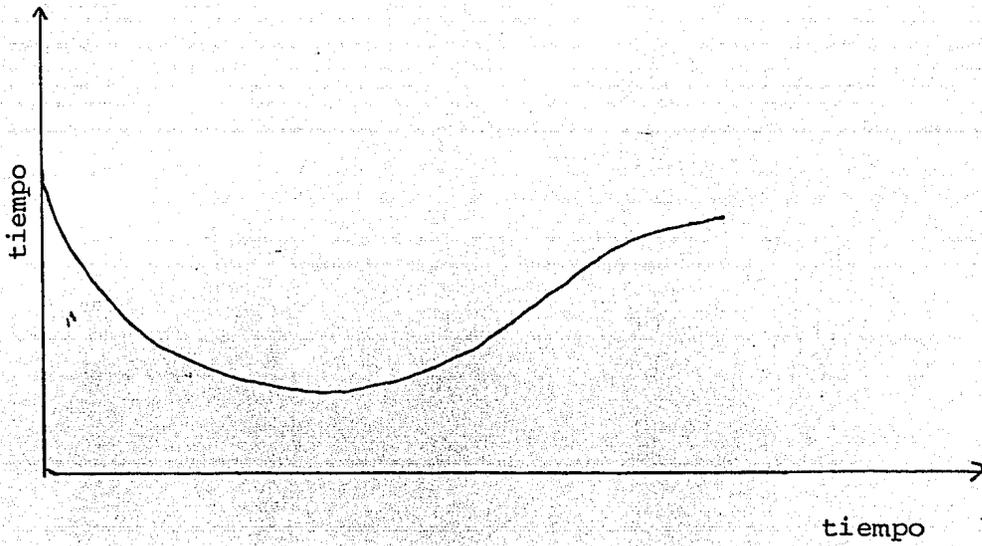


Fig. A Tomado de Dowben (1969)

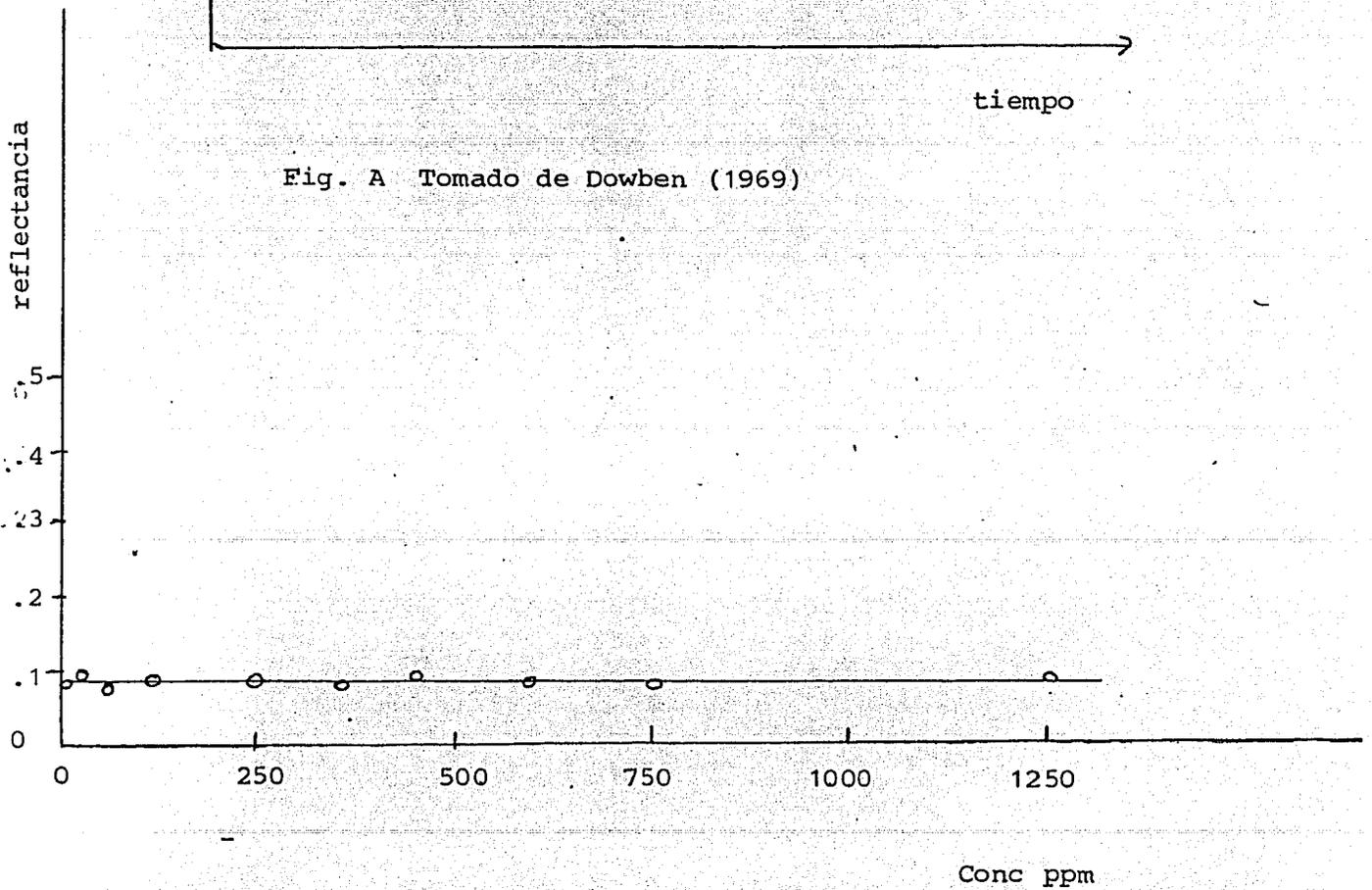


Fig. B

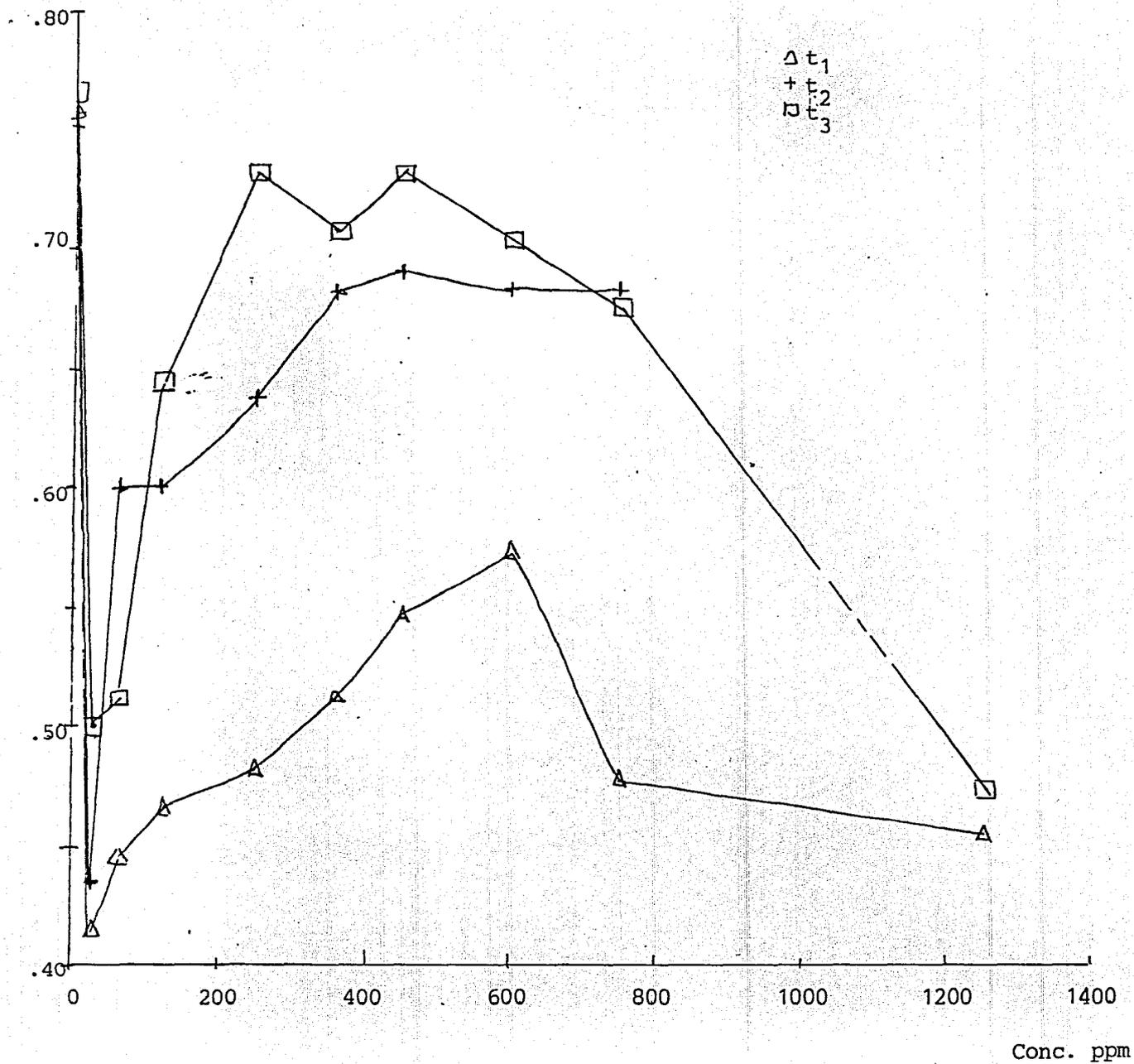


Fig C

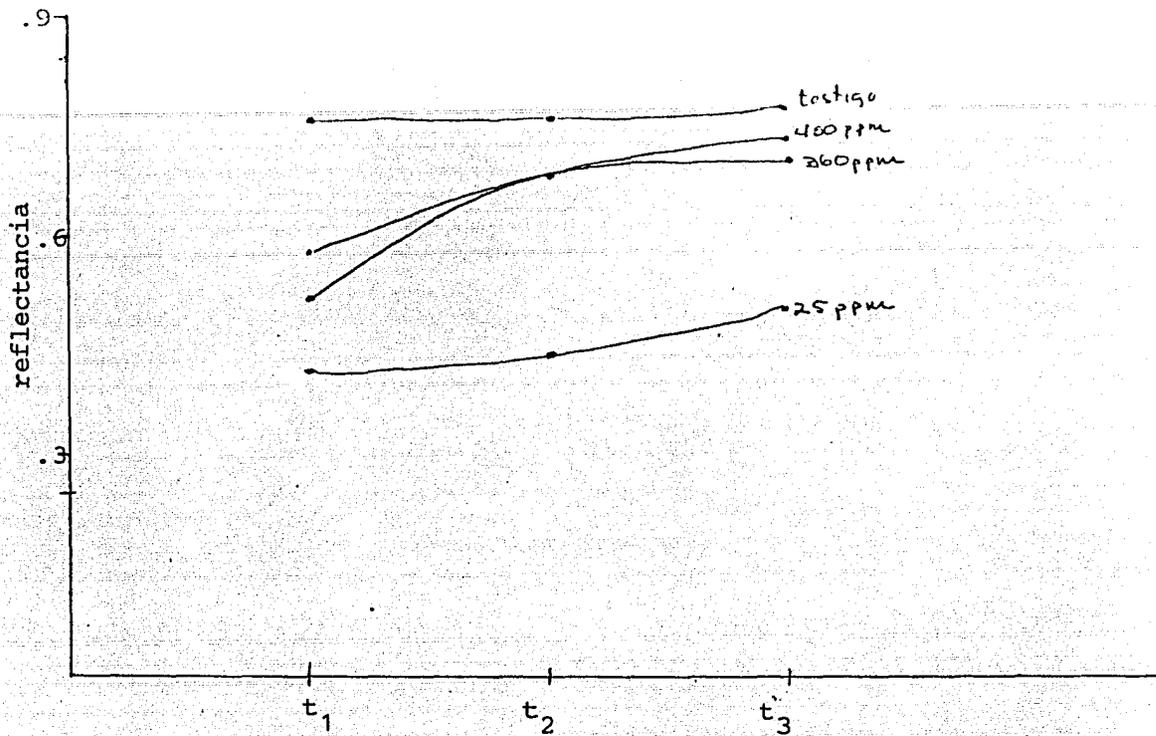


Fig D.

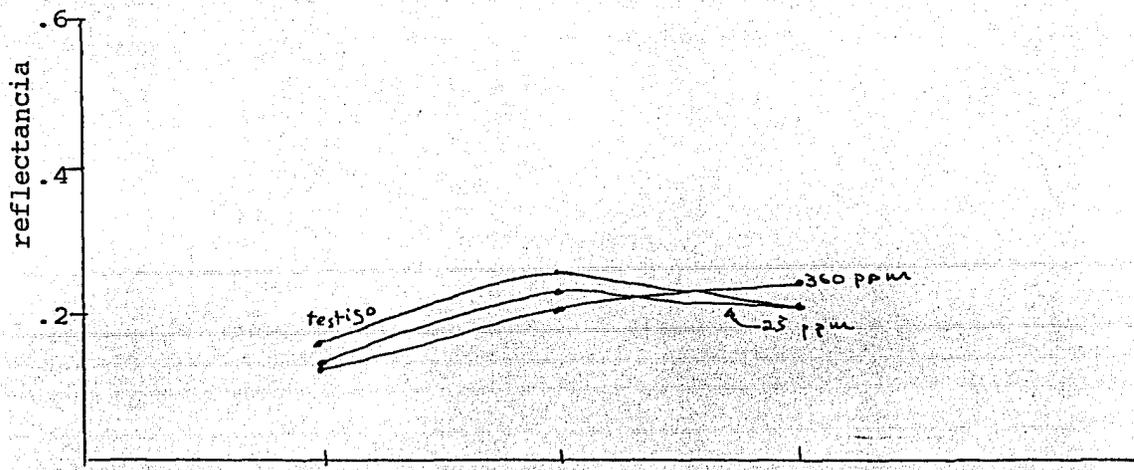


Fig. E

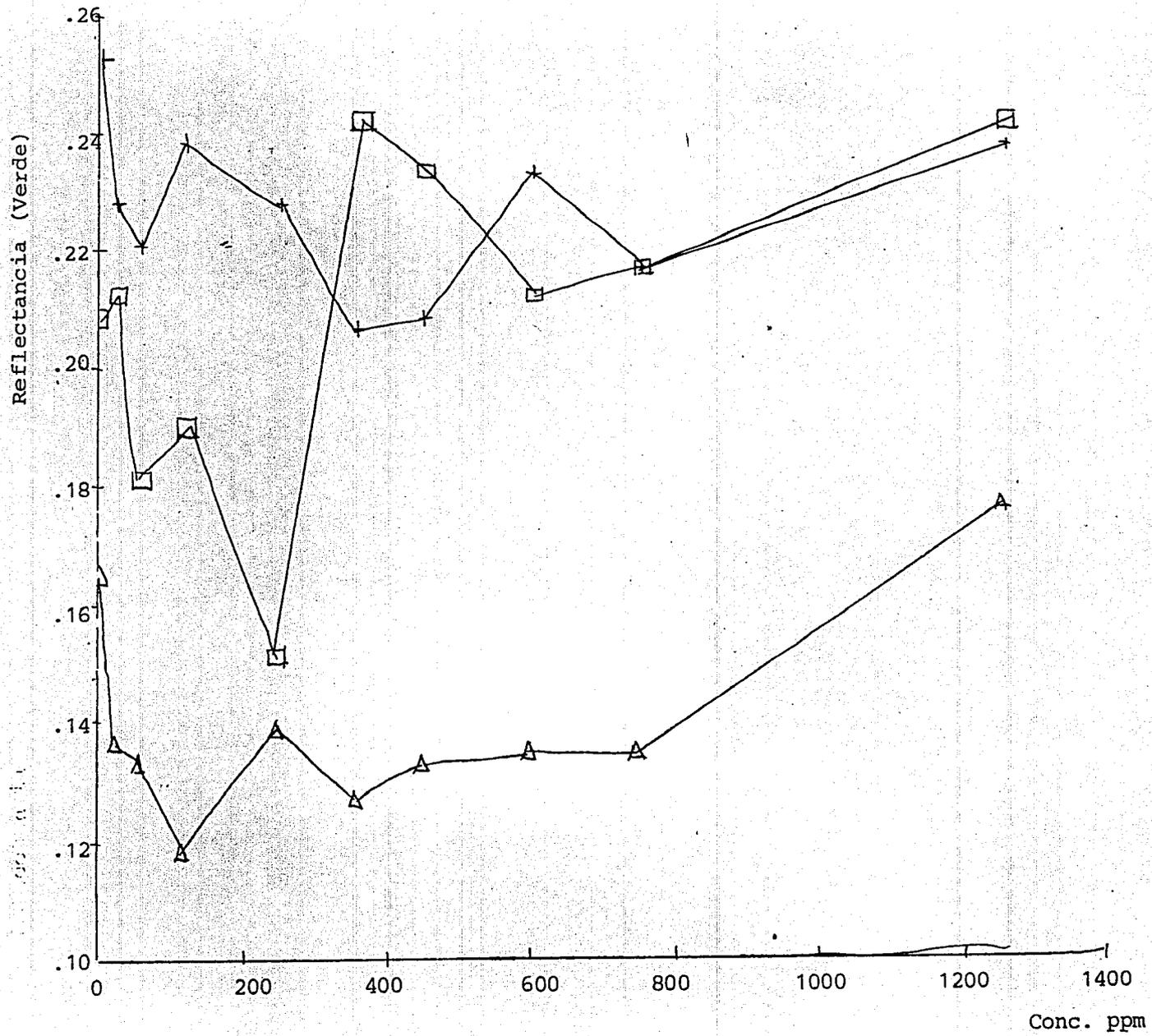


Fig. E

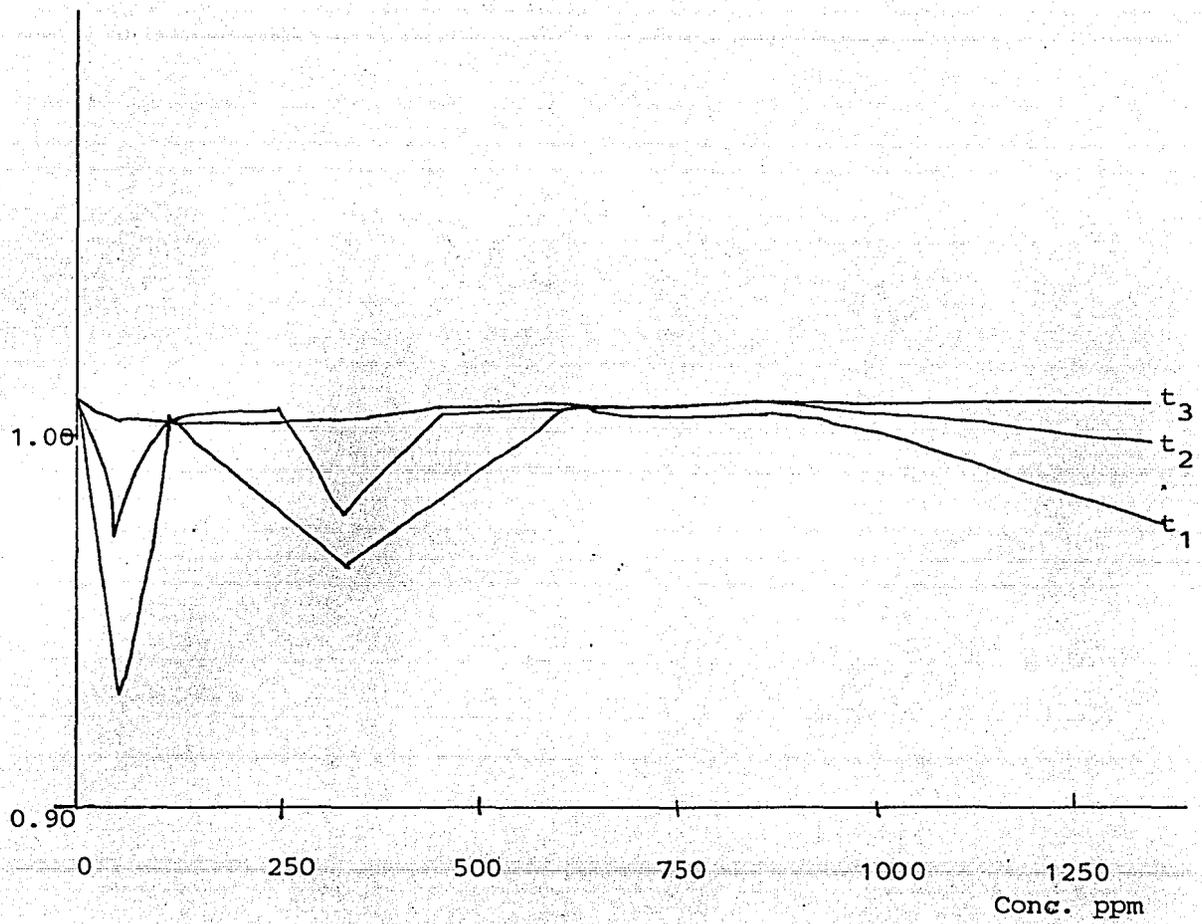


Fig. G Valores de TVI

REFERENCIAS

Aarkog R., M. Lippert. (1971) Direct contamination of barley with Cr, Co, Zn, Hg and Pb. Radiat. Bot. 11, 463.

Bazzaz F.A., R.W. Carlson., G.L. Rolfe (1974) The effect of heavy metals on plants. I. Inhibition of gas exchange in sunflower by Pb, Cd, Ni and Ti. Environ. Pollut.. 7, 241.

Colwell R.N. (1970) Applications of Remote Sensing in Agriculture and Forestry. Remote Sensing. National Academic of Sciences. 164.

Conger A.D. (1964) A simple liquid-culture method of growing plants. Florida State Horticultural Soc. Miami 77, 3.

Feynman R.; R. Lighton (1963) The Feynman lectures on physics. Vol I. Addison Wesley Pub. Co. Reading Mass. 28-1 , 28-2.

Fuhrer J., K.H. erismann., H.J. Keller, A. Favre (1981) A system for quantitative determination of species and vitalities of urban trees on color IR photography. Rem Sens. of Environ. 11, 1.

Gough L., T. Hansford, T. Shaclitte, A. Case (1979) Element concentrations toxic to plants, animals and man. Geological Survey Bulletin H66. Departament of the Interior.

Gough L.P., R.K. Vincent (1982) An experiment with Mn/Fe ratios in plant samples from oil and gas fields in Michigan. Second Thematic Conference. International Symposium on Remote Sensing of Environment. Forth Worth, TX U.S.A.

Hampel A.C., G.G. Hawley (1973) The Encyclopedia of Chemistry. Third Edition. Van Nostrand Reinhold Co. N.Y. 220.

Hunter J.G., O. Vergnano (1953) Trace element toxicities in oat plants. *App. Biol.* 40, 761.

Jenkins F.A., H.E. White (1957) Fundamentals of Optics. Third Edition. McGraw-Hill . Cap. 11

Kamlish L., R. Howe, P. Mansel (1982) An evaluation of data enhancement techniques for a geobotanical test site; Soldiers Delight, Maryland. Second Thematic Conference. International Symposium on Remote Sensing of Environment. Forth Worth TX U.S.A.

Kodak B-3 (1970) Filters for scientific and Technical uses. Rochester N.Y. U.S.A.

Kodak M-28 (1977) Applied Infrared Photography. Rochester N.Y. USA

Kodak P-315 (1973) Kodak plates and films for scientific photography First Ed. Rochester N.Y. USA

Lahouti M., P. Peterson (1979) Chromium Accumulation and Distribution in Crop plants. *J. Sci. Food Agric.* 30, 136.

Lathrop L.D., S.P. Pennypacker (1980) Spectral classification of tomato disease severity levels. *Photogramm. Eng. and Rem. Sens.* 46, 1433

Lehninger A. (1975) Biochemistry Second Edition Worth Pub. Inc. N.Y. USA

Machle W, F. Gregorius (1948) Cancer of the respiratory systems in the United States chrome producing industries. *Pub. Health Rep.* 63, 114.

Mehrdad L., P. Peterson (1979) Chromium Accumulation and Distribu-

tion in crop plants. *J.Sci. Food. Agric* 30, 136.

Mertz N (1969) Chromium occurrence and function in biological Systems
Physiol. Rev. 49, 163.

Mika Jozsef, T. Torok (1974) Analytical Emission Spectroscopy. Crane
Russak and Co. Inc. N.Y. USA

Murtha P.A. (1978) Remote Sensing and Vegetation Damage: A theory
for detection and assessment. *Photogram. Eng. and Rem. Sens.* 44,
1147.

Reeves R., A. Anson, D. Landen (1975) Manual of Remote Sensing. Vol I
American soc. of photogrammetry. Falls Church VA USA

Soane S., C. Saunder (1959) Nickel and chromium toxicity of serpen-
tine soils in Southern Rhodesia. *Soil Sci.* 88, 322.

Sullivan R.S. (1969) Preliminary air pollution survey of chromium
and its compounds. A literature review. U.S. Dept of Health, Educa-
tion and Welfare. USA

Suits G. (1972) The Calculation of the directional reflectance of
a vegetative canopy. *Rem. Sens. of Environ.* 2 117.

Storer E.R., R. Baumgardner (1980) Physicochemical, site and bidi-
rectional reflectance factor characteristics of uniformly moist
soils. LARS Technical Report 111679. Purdue University.

Tucker C.J. (1979) Red and photographic IR linear combinations for
monitoring vegetation. *Rem. Sens. of Environ.* 8, 127.

Vincent R.K., J. Herman (1982) Landsat Exploration for precious me

tals and molibdenum in East-Central Idaho. Second Thematic Conference. International Symposium on Remote Sensing of Environment. Fort Worth TX USA

Weast R.C. (1974) Handbook of Chemistry and Physics. CRC Press Cleveland Ohio USA

Yamakura F., K. Suzuki (1980) Cadmium chromium and manganese replacement for iron super-oxide dismutase from Pseudomonas ovalis. Journal Biochem. 88, 191.