

Efecto de las sales solubles del suelo sobre las reflectancias de los cultivos y sus implicaciones en el diseño experimental

Effect of soil soluble salts on crop reflectances and their implications in experimental design

Fernando Paz Pellat^{1‡}, Luis Alberto Palacios Sánchez² y Carlos Ramírez Ayala³

¹ GRENASER, Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Km 36.5 Carretera México-Texcoco. 56230 Montecillo, Edo. de México, México.

[‡] Autor responsable (ferpazpel@gmail.com)

² Servicios de Estudios en Ingeniería y Sistemas, S.A. de C.V. Tezozomoc 55, Colonia Cuauhtémoc. 83294 Hermosillo, Sonora, México.

³ Programa de Hidrociencias, Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Km 36.5 Carretera México-Texcoco. 56230 Montecillo, Edo. de México, México.

RESUMEN

La salinización de suelos agrícolas es uno de los factores limitantes de la agricultura moderna, por lo cual la comprensión de los efectos de este fenómeno es interés en las ciencias agrícolas. La capacidad de predicción de su avance y su monitoreo continuo permiten tomar decisiones correctas para un aprovechamiento sostenible del recurso suelo. En el presente trabajo se analiza el espacio espectral de las reflectancias de los cultivos, con énfasis especial en el caso de suelos cubiertos totalmente por cultivos en el contexto de los patrones espectrales del crecimiento. Partiendo de los efectos de la salinidad en los cultivos, se introduce el modelo bifásico de Munns y Termmat adaptándolo para el caso de espacios espectrales de la reflectancia del dosel de un cultivo. El modelo fue parcialmente validado con datos de experimentos (soya y cebada) publicados en la literatura. Del análisis de los patrones de tolerancia del experimento de cebada, resulta claro que es necesario realizar estas estimaciones bajo condiciones estandarizadas de estados de desarrollo. Los diferentes patrones de senescencia de los cultivos, inducidos por los tratamientos de salinidad, dificultan la tarea de establecer un patrón estándar de comparación para los rendimientos y biomásas aéreas. Los resultados obtenidos son alentadores y abren una nueva forma de analizar el efecto de la salinidad sobre los cultivos, reduciendo fuertemente los costos y tiempos implicados en los diseños experimentales

convencionales, mostrando que existe una ruta muy simple para obtener resultados similares a un experimento convencional de tratamientos de salinidad.

Palabras clave: espacio del visible e infrarrojo, soya y cebada, efecto de la salinidad, patrones meta-paramétricos.

SUMMARY

Salinization of agricultural soils is one of the limiting factors of modern agriculture. For this reason, understanding the effects of this phenomenon is of interest to agricultural sciences. The ability to predict its progress as well as continuous monitoring can support decision-making for sustainable use of the soil resource. In the present work, the spectral space of crop reflectances is analyzed, with special emphasis on the case of soils fully covered by crops in the context of spectral growth patterns. Starting from the effects of salinity in the crops, the biphasic model of Munns and Termmat is introduced, adapting it for the case of spectral spaces of the reflectance of the crop canopy. The model was partially validated with data from experiments (soybean and barley) published in the literature. From the analysis of tolerance patterns of the barley experiment, it is necessary to make these estimations under standardized conditions of development stages. The different patterns of crop senescence, induced by salinity treatments, make it

Cita recomendada:

Paz Pellat, F., L. A. Palacios Sánchez y C. Ramírez Ayala. 2018. Efecto de las sales solubles del suelo sobre las reflectancias de los cultivos y sus implicaciones en el diseño experimental. *Terra Latinoamericana* 36: 355-368. DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v36i4.400>

Recibido: abril de 2018. Aceptado: agosto de 2018.

Publicado en *Terra Latinoamericana* 36: 355-368.

difficult to establish a standard pattern of comparison for shoot biomass and yields. The results obtained are encouraging and open a new way of analyzing the effect of salinity on crops, greatly reducing costs and times involved in conventional experimental designs, showing that there is a very simple route to obtain results similar to a conventional experiment salinity treatments.

Index words: *visible and infrared space, soybean and barley, salinity effect, meta-parametric spaces.*

INTRODUCCIÓN

La salinización de suelos agrícolas es uno de los factores limitantes de la agricultura moderna. La salinidad reduce los rendimientos potenciales de los cultivos y degrada los suelos (Mass y Hoffman, 1977). La comprensión de los efectos de este fenómeno, natural o producido por el ser humano, es una de las actividades de fuerte interés en las ciencias agrícolas. La capacidad de predicción de su avance y su monitoreo continuo permiten tomar decisiones correctas para un aprovechamiento sostenible del recurso suelo.

La opción del monitoreo de las reflectancias de los cultivos para predecir su estado fisiológico, producto de las sales solubles en el suelo, permite la utilización de técnicas masivas de muestreo como los sensores remotos. Al respecto, existen trabajos (Wiegand *et al.*, 1992 y 1994; Pulido *et al.*, 1997; Abuzar *et al.*, 2001), donde se utilizan índices de vegetación que usan las bandas infrarrojas y visibles de los sensores remotos o utilizan una regresión estadística de la salinidad contra las bandas visibles para predecir el estado de la salinidad de los suelos. Los resultados de este enfoque han sido inciertos, con coeficientes de correlación generalmente menores a 0.5. La explicación de estos resultados puede plantearse si se considera que el sensor remoto capta información espectral de una mezcla de suelo-planta-atmósfera, la cual al ser analizada con índices de vegetación o similares produce una respuesta totalmente dependiente de la mezcla mencionada (Paz *et al.*, 2005 y 2015).

Adicionalmente al caso del uso de índices y técnicas empíricas de análisis de las reflectancias, la utilización de información de campo cuasi-puntual e indirecta (sensor EM-38, por ejemplo), para calibrar las reflectancias, introduce un sesgo importante en los análisis que dificulta aún más la obtención de resultados útiles, dados los efectos de escala introducidos (Zarco *et al.*, 2008).

En lo general, el análisis de las reflectancias en el dosel de los cultivos ha sido enfocado, arbitrariamente, con técnicas empíricas que ignoran los principios de transferencia de radiación en el dosel (Myneni *et al.*, 1989; Ross, 1981) y las propiedades biofísicas y bioquímicas de los cultivos y sus elementos constitutivos como clorofilas, carotenoides etc. (Jacquemoud y Baret, 1990; Jacquemoud, 1993; entre otros). En el aspecto del efecto de la salinidad en los cultivos, las técnicas utilizadas han sido similares. De esta discusión sobresale la necesidad de un modelo teórico-conceptual que permita comprender los resultados obtenidos de los muestreos, remotos o de campo/laboratorio, de las propiedades espectrales de los cultivos en ambientes de suelos salinos. Este trabajo es una primera aproximación a esa meta, bajo la consideración de información espectral restringida de dos experimentos de campo en cultivos soya y cebada.

MATERIALES Y MÉTODOS

Espacios Espectrales de los Cultivos

Considerando que la información espectral utilizada en este trabajo fue tomada bajo la condición de cobertura total, o casi total, del suelo por el cultivo, en esta sección se discute este caso particular en el contexto de los patrones de crecimiento espectrales.

La Figura 1 muestra el espacio IRC (infrarrojo cercano, centrado alrededor de 830 nm) y el R (rojo, centrado alrededor de 660 nm), el cual es similar al V (Verde, centrado alrededor de 560 nm) y al A (azul, centrado alrededor de 460 nm).

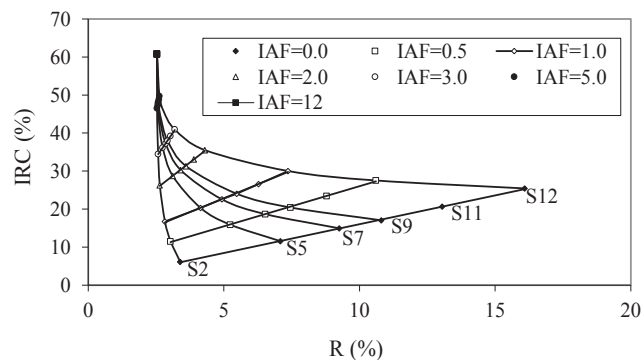


Figura 1. Espacio espectral IRC-R, reflectancias en porcentajes, para un cultivo en desarrollo. R = rojo; IRC = infrarrojo cercano; IAF = índice de área foliar; S = tipo de suelo.

Los valores de reflectancia del IRC y R (y otras bandas espectrales) fueron generados con el modelo SAIL (Verhoef, 1984), el cual es una aproximación unidimensional al caso tridimensional del transporte de fotones en el dosel de los cultivos. Paz *et al.* (2005) discuten el uso de simulaciones de transferencia de radiación en algunos espacios similares a los presentados más adelante.

La Figura 1 uso la reflectancia en una hoja sana de maíz, Figura 2, y con una distribución angular erectófila, Figura 3. Para las simulaciones se utilizaron seis tipos de suelos con propiedades ópticas diferentes, Figura 4. Las condiciones geométricas usadas fueron un ángulo cenital de iluminación de 30° y un ángulo cenital de visión del sensor de 0° (nadir).

De la Figura 1 se pueden definir varias características (Paz *et al.*, 2005):

a. La curva del suelo es aproximadamente lineal (Richardson y Wiegand, 1977), de la cual parten las curvas de iso-suelos (S2, S5, S7, S9, S11 y S12) que representan el crecimiento del cultivo teniendo como fondo el mismo suelo (su reflectancia)

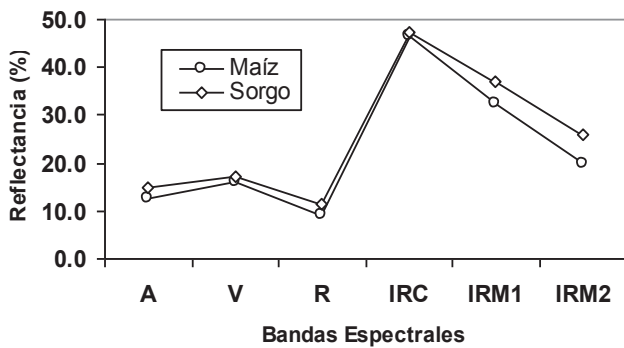


Figura 2. Espectro de la reflectancia de una hoja de maíz y sorgo. A = azul; V = verde; R = rojo; IRC = infrarrojo cercano; IRM 1 = infrarrojo medio 1; IRM 2 = infrarrojo medio 2.

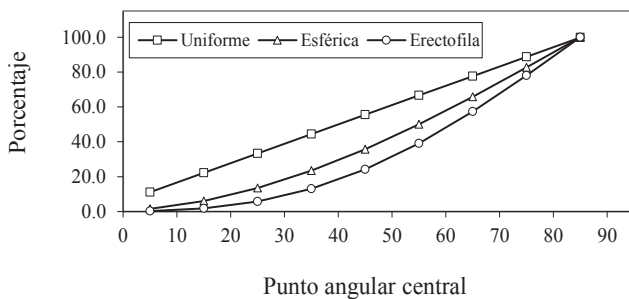


Figura 3. Distribuciones angulares acumuladas de las hojas.

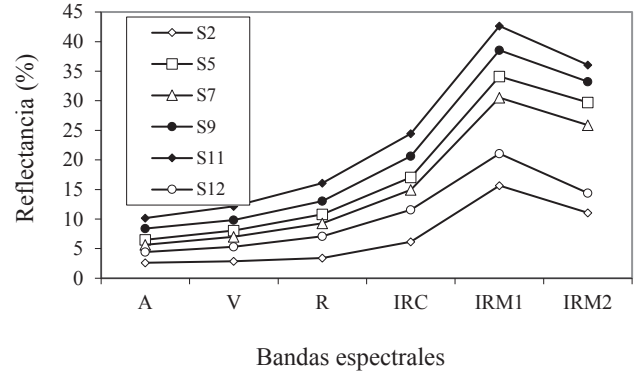


Figura 4. Espectro de la reflectancia de los suelos simulados. A = azul; V = verde; R = rojo; IRC = infrarrojo cercano; IRM 1 = infrarrojo medio 1; IRM 2 = infrarrojo medio 2; S = tipo de suelo.

b. Las curvas de iso-IAF (igual índice de área foliar, IAF) interceptan a las curvas de iso-suelos en puntos con igual IAF. Estas curvas son lineales (Huete, 1987; Huete *et al.*, 1999) y sus parámetros (pendiente e intersección) cambian con el IAF

c. La banda espectral R (A y V) se saturan al incrementarse el IAF, de tal forma que después del punto de saturación (la reflectancia no cambia de valor) de las bandas visibles, el IRC aumenta sobre una línea recta, mostrada por el ápice del “sombrero de tres picos” (“tasseled cap”; Kauth y Thomas, 1976) de la Figura 1, hasta que este alcanza también su punto de saturación.

d. La Figura 1 es un modelo estático de un proceso dinámico de crecimiento de los cultivos, representado por los IAF. Así, cada punto de la curva (un IAF y tipo de suelo) representa un punto en el tiempo, cronológico o fisiológico, del cultivo.

Los supuestos de la Figura 1 es que las reflectancias de los fitoelementos y su distribución angular no cambian con el tiempo (IAF). De la Figura 1 debe resultar claro que cualquier índice de vegetación, de los muchos propuestos (Baret y Guyot, 1991), que intente predecir el IAF es intrínsecamente incorrecto, ya que trata de describir una línea recta (iso-IAF) con un solo punto muestral (por un punto puede pasar un número infinito de líneas rectas).

Los casos experimentales (cobertura completa del suelo por los cultivos) analizados más adelante están en la condición de saturación de las bandas visibles (arriba del ápice de la Figura 1), por lo que es importante revisar el comportamiento espectral del cultivo con el suelo

cubierto por éste. En este caso se hicieron las mismas simulaciones de la Figura 1 para el caso de un suelo negro (reflectancias nulas), que representa la condición de un follaje denso del cultivo que absorbe toda la radiación que penetra al follaje (transmitancia nula). La Figura 5a muestra las reflectancias en el espectro visible en el caso que se observe solo al cultivo y no al suelo, las cuales se saturan para valores de IAF de 2-3. La Figura 5b muestra las reflectancias del IRC, IRM1 (Infrarrojo Medio 1, centrado alrededor de 1 700 nm) e IRM2 (Infrarrojo Medio 2, centrado alrededor de 2 200 nm). Se observa que el IRC no se satura fácilmente para valores altos del IAF, a diferencia del resto de las bandas espectrales.

La Figura 6 muestra el espacio espectral IRC-VIS (R, V, A), usado típicamente para el cálculo de índices de vegetación, donde los valores más grandes (líneas verticales) representan IAF mayores a los puntos de saturación del visible en los cultivos.

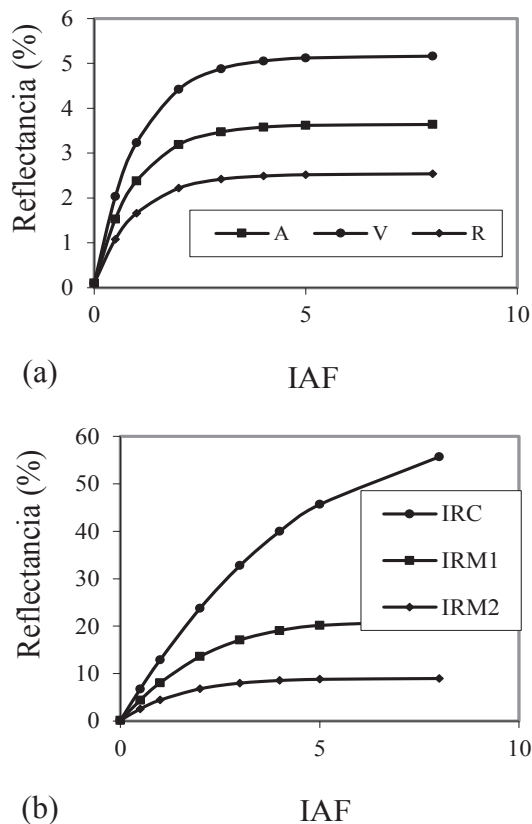


Figura 5. Reflectancias, en porcentaje, del cultivo para diferentes valores del IAF (índice de área foliar). (a) Bandas visibles (A = azul; V = verde; R = rojo). (b) Bandas infrarrojas (IRC = infrarrojo cercano; IRM 1 = infrarrojo medio 1; IRM 2 = infrarrojo medio 2).

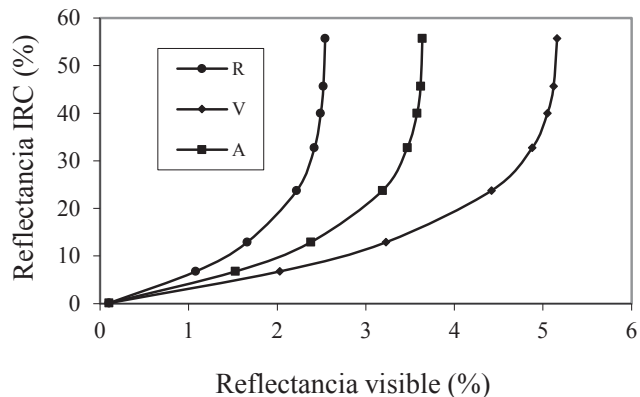


Figura 6. Espacio espectral IRC-VIS, reflectancias en porcentaje, para un cultivo solo. R = rojo; V = verde; A = azul; IRC = infrarrojo cercano.

La Figura 7 muestra el efecto del ángulo cenital de iluminación en las reflectancias del espacio espectral R-IRC del caso de observar solo al cultivo.

La Figura 8 muestra el efecto del cambio en la distribución angular de las hojas, Figura 3, en las reflectancias observar solo cultivo (líneas horizontales o verticales).

La Figura 9 muestra el efecto de un cambio en la reflectancia de las hojas, Figura 2, en la reflectancia del cultivo solo.

En todos los casos anteriores, la condición estándar fue la descrita para la Figura 1.

El análisis de la reflectancia de los cultivos para el ciclo completo, incluyendo la senescencia, esta fuera del alcance de este trabajo. Para visualizar esta situación es necesario considerar la dinámica temporal de la reflectancia de las hojas (Gitelson y Merzlyak, 1994).

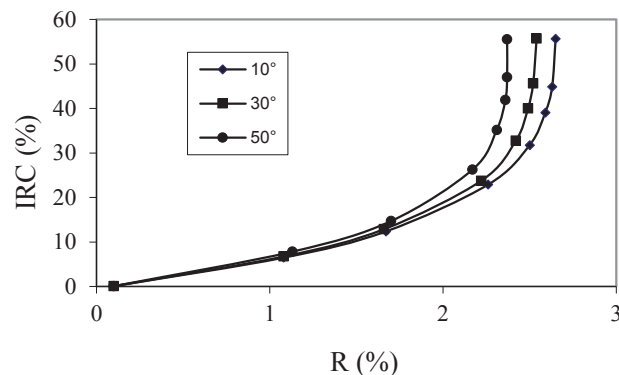


Figura 7. Efecto del ángulo cenital en el espacio espectral IRC-R, con reflectancias en porcentaje. R = rojo; IRC = infrarrojo cercano.

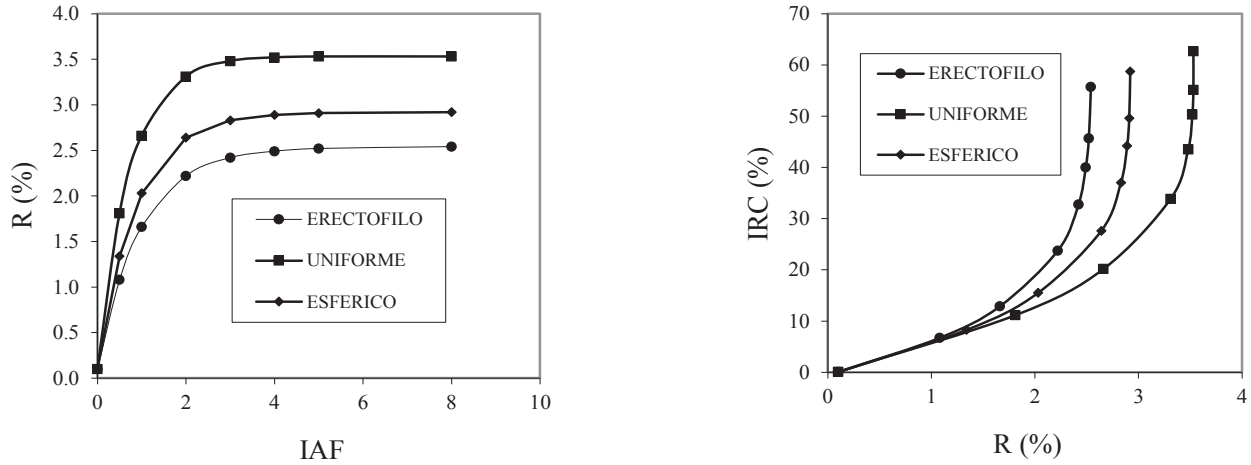


Figura 8. Efecto de la distribución angular de las hojas en las reflectancias del cultivo solo.

Modelo Bifásico del Efecto de la Salinidad en los Cultivos

La reflectancia del dosel de un cultivo es dependiente de la arquitectura de la planta (distribución angular y espacial de las hojas; área foliar, principalmente) y de las propiedades de las hojas (Ross, 1981). Estas características de la planta son afectadas por la salinidad del suelo, por lo que se manifiestan en la reflectancia del dosel.

Las sales solubles del suelo afectan a los cultivos de acuerdo con lo siguiente:

(a). Las dimensiones de las plantas se reducen: área foliar, tamaño de las hojas, altura, cobertura, elementos estructurales y orgánicos, biomasa (Igartua *et al.*, 1995; Sionit y Kramer, 1977; Abel y MacKenzie, 1964).

(b). Las funciones principales de las plantas, tales como la asimilación de CO₂ y fotosíntesis y crecimiento se ven afectadas (Nieman, 1965; Mass y Grieve, 1990; Dionisio-Sese y Tobita, 2000).

(c). La estructura y morfología de las hojas se ve alterada por el efecto de la salinidad (Abel y MacKenzie, 1964; Nieman, 1965; Gausman y Cardenas, 1968; Gausman *et al.*, 1972; Maas y Grieve, 1990).

(d). Las propiedades espectrales de las hojas, dependientes de su microestructura y concentración de pigmentos, se ven afectadas (Thomas *et al.*, 1971; Gausman *et al.*, 1969 y 1971; De La Rosa-Ibarra y Maiti, 1995; Abadía *et al.*, 1999).

El efecto de la salinidad en los cultivos se presenta como tensión hídrica y como toxicidad asociada a iones específicos. El efecto de la tensión hídrica se muestra

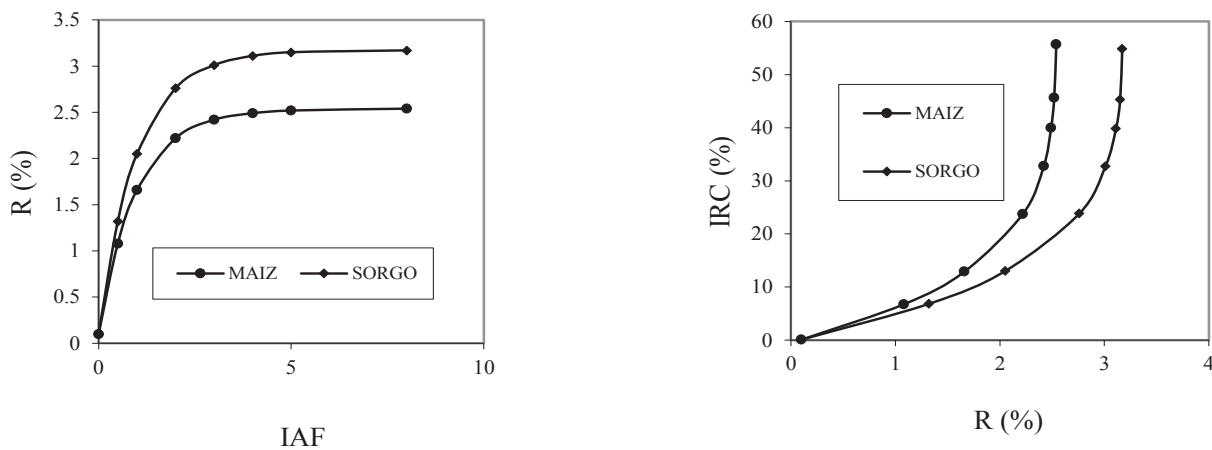


Figura 9. Efecto de la reflectancia de las hojas en la reflectancia, en porcentaje, de solo el cultivo (líneas horizontales o verticales). R = rojo; IRC = infrarrojo cercano; IAF = índice de área foliar.

en un incremento de la reflectancia de las bandas visibles y en una disminución, generalmente, de la reflectancia en el IRC (Thomas *et al.*, 1971; Gasuman *et al.*, 1971). El efecto de la toxicidad se manifiesta en cambios en el contenido de clorofila de las hojas, lo que provoca un incremento de ésta, con una respuesta similar en las reflectancias como la tensión hídrica. Al paso del tiempo, los efectos de tensión hídrica y toxicidad se manifiestan como un patrón similar al de la reflectancia en la senescencia de los cultivos (necrosis de las hojas). Por estas razones resulta muy difícil separar una respuesta de la reflectancia del dosel a una tensión hídrica o a una de tensión por sales solubles; además de que en el tiempo la respuesta se confunde con la de la senescencia natural.

En condiciones de campo, los cultivos usan múltiples estrategias para compensar los efectos adversos de la salinidad. Por ejemplo, la reducción del área foliar de una planta se ve compensada por un incremento en la concentración de clorofila en las hojas, aunque este factor no compense la mayor tasa de reducción del área foliar (Wang *et al.*, 2001). El efecto de la salinidad en la distribución angular de las hojas se desconoce.

Un esquema conceptual de explicación de los efectos de la salinidad en los cultivos es el modelo bifásico propuesto por Munns y Termaat (1986) y discutido por Munns (1993). En este modelo, el crecimiento de la planta es primero reducido por un incremento en el potencial hídrico del suelo y se regula por señales inhibitoras provenientes de las raíces. Así, la primera fase de reducción del crecimiento de la planta es un efecto de las sales fuera y no dentro de la planta. Después, el efecto específico de las sales aparece como un daño producido por éstas en las hojas viejas, las cuales mueren debido a un incremento rápido en la concentración de sales en la pared celular o el citoplasma. Al inicio de la primera fase por tensión hídrica, las vacuolas de las células empiezan a acumular sales hasta que se saturan, por lo que no pueden continuar almacenándolas posteriormente. Al saturarse las vacuolas de sales, la pared celular o el citoplasma empiezan a acumularlas, pero con un efecto mayor en la reducción del crecimiento de la planta.

Cuando la tasa de mortalidad de las hojas viejas (que han acumulado más sal que las nuevas) se aproxima a la tasa de producción de hojas nuevas, entonces hay una caída substancial en el suministro de asimilados a

las hojas en crecimiento, o un cambio en el suministro de reguladores del crecimiento, y el crecimiento de la planta se reduce en consecuencia aún más.

La Figura 10 muestra en forma esquemática el modelo bifásico de Munns y Termaat. Para diferentes genotipos o variedades de un cultivo, éstas responden en forma similar en el corto plazo (fase 1), pero en el largo plazo responden en forma diferente (fase 2). Las diferencias en las respuestas de los genotipos se manifiestan en el tiempo que las sales tardan en alcanzar su concentración máxima en las vacuolas de células mesófilas. La muerte de las hojas se inicia durante la fase 1, pero el efecto en el crecimiento y expansión de las hojas nuevas no se presenta por algún tiempo, que puede ser de semanas o meses.

Las hojas mueren más rápidamente en una variedad que es más sensible a la salinidad debido a que las sales llegan más rápido a las células, o debido a que las células son incapaces de almacenar las sales en las vacuolas en la misma concentración que las variedades tolerantes (Munns y Termaat, 1986).

El modelo bifásico predice que las diferencias en la tolerancia a la salinidad, entre variedades de genotipos diferentes, tomarán algo de tiempo en manifestarse y solo se presentarán cuando exista un daño visible en las hojas más viejas. Las implicaciones de este modelo bifásico en la selección de genotipos tolerantes a la salinidad es que se requiere estudiar la respuesta del cultivo en el ciclo completo de crecimiento y muerte.

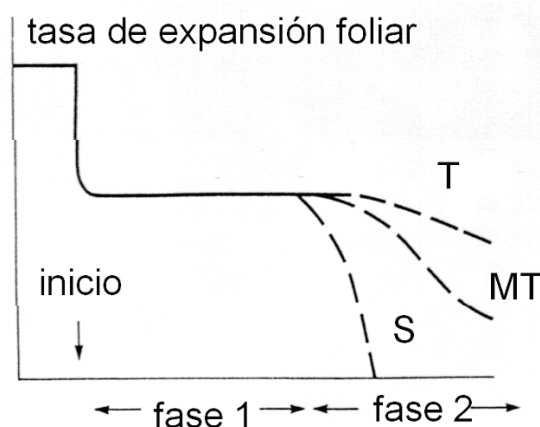
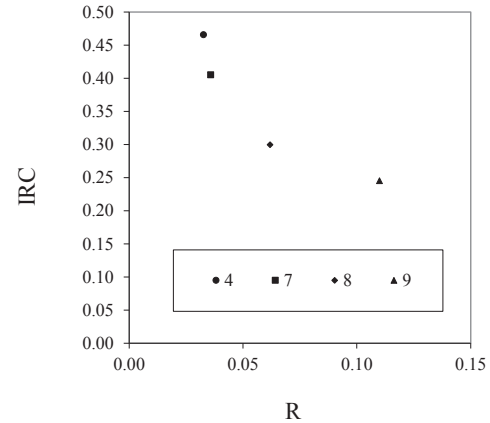


Figura 10. Modelo bifásico de respuesta del crecimiento a la salinidad por tres genotipos diferentes de un cultivo. T = tolerantes; S = sensibles; MT = moderadamente tolerantes.

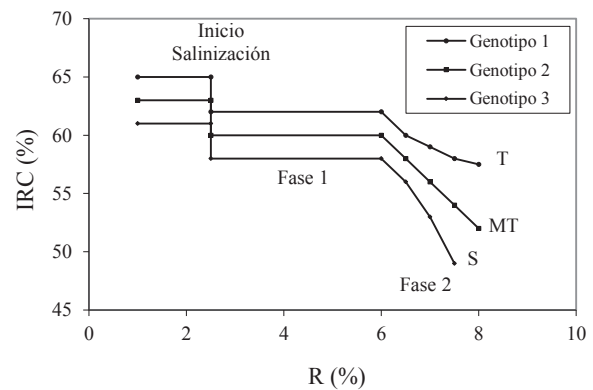
El modelo bifásico de Munns y Termaat puede ser adaptado al caso de la reflectancia del dosel de los cultivos. La Figura 11a muestra un espacio espectral del visible o VIS (bandas A, V, R)-IRC para el caso de un cultivo normal sin tensión o estrés y otro sujeto a un ambiente salino del suelo. El efecto de la salinidad se manifiesta como una reducción en la reflectancia en el IRC y un incremento de ésta en el VIS. La trayectoria del cultivo salino dentro del “sombrero de tres picos” se desconoce, pero el comportamiento espectral del cultivo en la etapa de saturación del visible (cobertura total y etapa posterior al desarrollo vegetativo, generalmente) puede ser inferida de acuerdo con el modelo bifásico. La Figura 11a muestra la trayectoria espectral del cultivo sano en la etapa de senescencia, donde éste incrementa su reflectancia en el visible casi-linealmente (reducción en la clorofila foliar) hasta un punto donde el comportamiento es generalmente no lineal (necrosis progresiva de las hojas). Este mismo patrón, pero más acelerado, se presenta para el cultivo salino. Ambas curvas de reducción de las reflectancias (necrosis acelerada) convergen en una sola, Figura 11a.

La Figura 11b muestra un esquema del modelo bifásico en el espacio espectral VIS-IRC, donde la fase 1 representa un incremento de la reflectancia de la banda visible para los tres genotipos presentados. Las curvas de la etapa acelerada, fase 2, muestran distintos patrones (pendientes) de acuerdo con la tolerancia a la salinidad de los genotipos. La intersección de un genotipo particular durante su crecimiento con la fase 1 dependerá de la mezcla suelo-cultivo y de las características de este último (geometría y propiedades espectrales de las hojas, principalmente), Figura 11a. En la Figura 11b, el inicio de la fase 2 en los genotipos considerados se tomó como igual; aunque en realidad cada genotipo inicia su senescencia en forma diferente (diferentes valores de IRC), Figura 10.

Las implicaciones del modelo bifásico presentado en la Figura 11 son muy importantes, si éste es válido. La Figura 11a muestra que es posible caracterizar la respuesta de un genotipo a la salinidad sin necesidad de realizar un experimento, ya que ambas condiciones (normal y salina) convergen en la fase 2. Esto es, al estudiar el patrón espectral de senescencia de un genotipo se puede caracterizar el patrón de respuesta de éste a la salinidad. Por otro lado, el diseño de un experimento con diferentes niveles de salinidad tendrá como resultado un mismo patrón en la fase 2.



(a)



(b)

Figura 11. Modelo bifásico del efecto de la salinidad en las reflectancias del espacio espectral VIS-IRC. (a) Espacio R-IRC (en proporciones) de punto de muestreo de los genotipos 4, 7, 8 y 9; (b) modelo de evolución temporal en el espacio del R-IRC, en porcentaje, para los genotipos 1, 2 y 3. Las variables definidas son R = rojo e IRC = infrarrojo cercano; T = tolerante, MT = moderadamente tolerante; S = sensible.

Para entender esto, considérese que los dos patrones de la Figura 11a representan dos niveles de salinidad en el mismo genotipo, por lo que su patrón espectral común emergerá en la fase 2. Por otra parte, el tiempo se refleja en la Figura 11 como un incremento en la reflectancia del R.

De la Figura 11a, con las pendientes de las curvas (transformadas o no logarítmicamente) es posible caracterizar la resistencia a la salinidad de un genotipo dado y hacer selecciones genéticas con base en indicadores completos de la planta, tal como la respuesta espectral. Isla *et al.* (1998) y Munns (1993) realizan una discusión en relación con este tópico.

Tolerancia a la Salinidad de los Cultivos

La evaluación de la tolerancia a la salinidad de los cultivos es comúnmente evaluada usando la conductividad eléctrica en el extracto de saturación del suelo CE_e (Maas, 1986, 1990; Maas y Hoffman, 1977), modelada de acuerdo con la relación:

$$\frac{R}{R_m} = 1.0 - p(CE_e - CE_{e,u}) \quad (1)$$

donde R es el rendimiento del cultivo (kg m⁻² o similar), R_m es el rendimiento máximo del cultivo (sin efecto de la salinidad), CE_{e,u} es la CE umbral donde después de este valor el rendimiento del cultivo empieza a disminuir y p es la pendiente de la curva de decrecimiento del rendimiento por efecto de la salinidad en el suelo. La Figura 12 muestra gráficamente la relación (1).

La relación (1) es usada para comparar el efecto relativo de la salinidad del suelo sobre los rendimientos de los cultivos. Sin pérdida de generalidad, la parte después de CE_{e,u} en la Figura 12 puede ser modelada por:

$$R = a_0 - b_0 CE_e \quad (2)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Evidencia Experimental

Los datos disponibles sobre experimentos de campo o invernadero sobre la respuesta espectral del dosel de un cultivo a la salinidad son muy escasos.

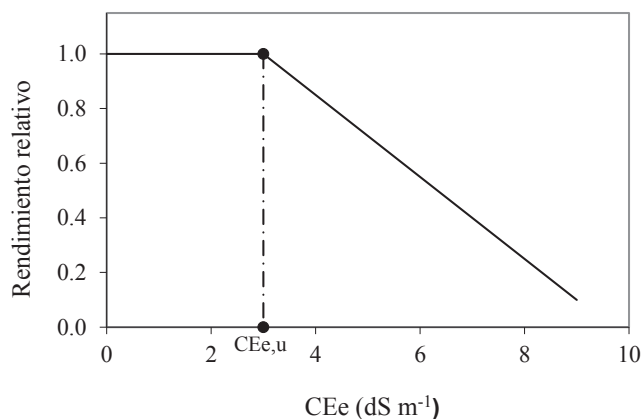


Figura 12. Modelo del efecto de la salinidad del suelo sobre el rendimiento de los cultivos, CE_e es la conductividad eléctrica en el extracto de saturación del suelo.

Entre estos pocos trabajos se encuentra el análisis de un cultivo de soya afectado por salinidad realizado por Wang *et al.* (2001 y 2002). Este experimento consistió en aplicar un nivel de salinidad de CE_e ≈ 10 dS m⁻¹ a una parcela y establecer una parcela de control con CE_e ≈ 1.2-1.6 dS m⁻¹. Las respuestas espectrales del dosel publicadas de este experimento fueron digitalizadas y los resultados se muestran en la Figura 13 para el espacio espectral VIS-IRC. Las reflectancias en el experimento tienen un efecto de cambio en el ángulo cenital de iluminación (Figura 7), lo cual no enmascara el patrón observado de reflectancias.

Se observa de la Figura 13 un patrón espectral en concordancia con el modelo bifásico discutido. En el caso de la banda espectral Azul (A), ésta se satura rápidamente, Figura 13, por lo que no es conveniente su uso. El patrón observado en la fase 2 de la soya es del tipo lineal. En la Figura 13, un incremento en la reflectancia en el R implica un incremento en el factor tiempo. Así, los puntos más a la derecha representan reflectancias en fechas más tardías de observación.

La Figura 14 muestra la relación entre el IAF del cultivo salino y el de control (Wang *et al.*, 2001), donde se observa un patrón razonablemente lineal hasta un punto donde el IAF del cultivo de control decrece (inicio senescencia).

La linealidad entre los IAF de los cultivos sugiere un patrón angular de las hojas similar en ambos cultivos. Esto puede revisarse de la Figura 15, la cual muestra una relación lineal entre las reflectancias en el VIS y un patrón sin cambio en el IRC.

Otro experimento analizado fue con cebada realizado por Peñuelas *et al.* (1997), quienes analizaron la reflectancia del dosel de 10 genotipos de cebada. El genotipo 1 sometido a 10 niveles de salinidad y el resto de los genotipos solo a 4 niveles. Las mediciones de reflectancia se hicieron para cobertura completa del suelo por el cultivo. Los tratamientos de salinidad variaron desde 0.8 a 1.9 dS m⁻¹ de salinidad aparente del suelo, CE_a, medida con el sensor EM-38. Los valores de reflectancia se tomaron con diferentes ángulos cenitales de iluminación; aunque no cambiaron los patrones observados. Los datos del experimento fueron proporcionados por el autor principal de este trabajo.

La Figura 16 muestra los valores de reflectancia del dosel para el genotipo 1 de cebada. Estos valores corresponden a los tratamientos 4, 7, 8 y 9 de salinidad (salinidad aparente de 1.26, 1.56, 1.72 y 1.9 dS m⁻¹; respectivamente). Se observa un patrón en la fase 2 de tipo tolerante, Figura 11a.

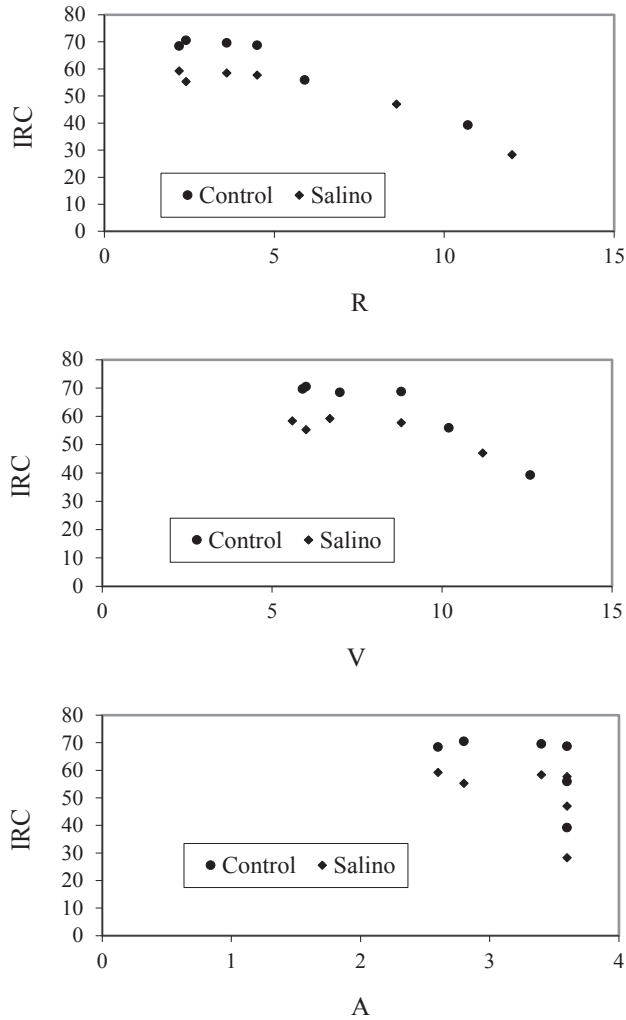


Figura 13. Espacio espectral VIS-IRC para el experimento del efecto de la salinidad en la soya (Wang *et al.*, 2002), donde las reflectancias (R = rojo; V = verde; A = azul; IRC = infrarrojo cercano) están en porcentaje.

Dado que para el resto de los genotipos solo analizaron 4 niveles de salinidad (salinidad aparente de 0.8, 0.86, 1.26 y 1.72 dS m^{-1}), se utilizó solamente los dos últimos niveles de salinidad, dado que están más cercanos al patrón de la fase 2, para estimar las pendientes (m , negativas) de las curvas de la fase 2. Los valores con pendientes positivas no fueron usados por posibles errores, o por el hecho de que estos valores están alejados de la curva de la fase 2. La Figura 17 muestra que las pendientes lineales (m) del espacio R-IRC obtenidas para los genotipos analizados, mostraron que los genotipos con pendiente menor

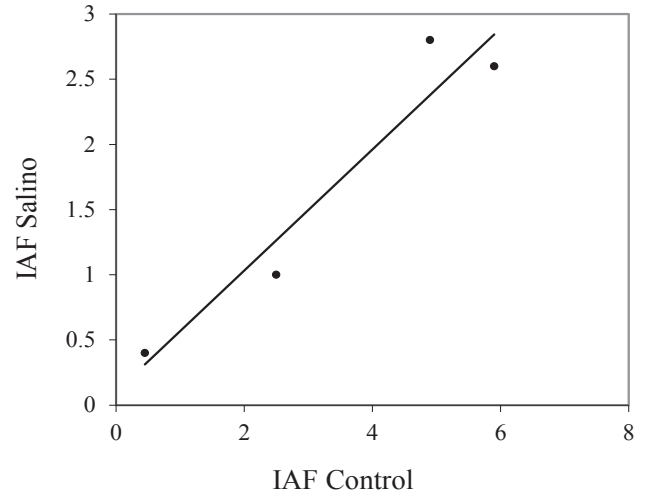


Figura 14. Relación entre los IAF (índice de área foliar) del cultivo salino y el de control.

son los más sensibles (genotipos 2, 5, 6 y 9) y las con pendiente mayor son los más tolerantes (genotipos 1, 3 y 10).

Las pendientes calculadas para las otras bandas del espacio VIS-IRC están mostradas en la Figura 18, donde se nota claramente su patrón (no lineal).

Tolerancia a la Salinidad de los Cultivos

Para diferentes respuestas a la salinidad de los genotipos de un cultivo particular, los valores de los parámetros a_0 y b_0 de la relación (2) cambian con cada genotipo. En este contexto se puede analizar el grado de tolerancia de diferentes genotipos si se calculan los parámetros de la relación (2) para cada uno de éstos y se grafican. En las Figuras 13 y 16, se observa que las curvas espectrales convergen en puntos comunes, por lo que de la propiedad de un conjunto de curvas (transformadas linealmente) que se interceptan en un punto común, generan un espacio meta-paramétrico, donde los parámetros de las líneas rectas están sobre una línea recta (Paz *et al.*, 2009).

Usando la información del experimento de los 10 genotipos de la cebada discutidos anteriormente, la Figura 19 muestra la gráfica de los parámetros (espacio meta-paramétrico) de la relación (2) para los distintos genotipos. La relación (2) fue estimada utilizando solamente los niveles de salinidad 4 y 8 (1.26 y 1.72 dS m^{-1} de la CEa respectivamente), dado

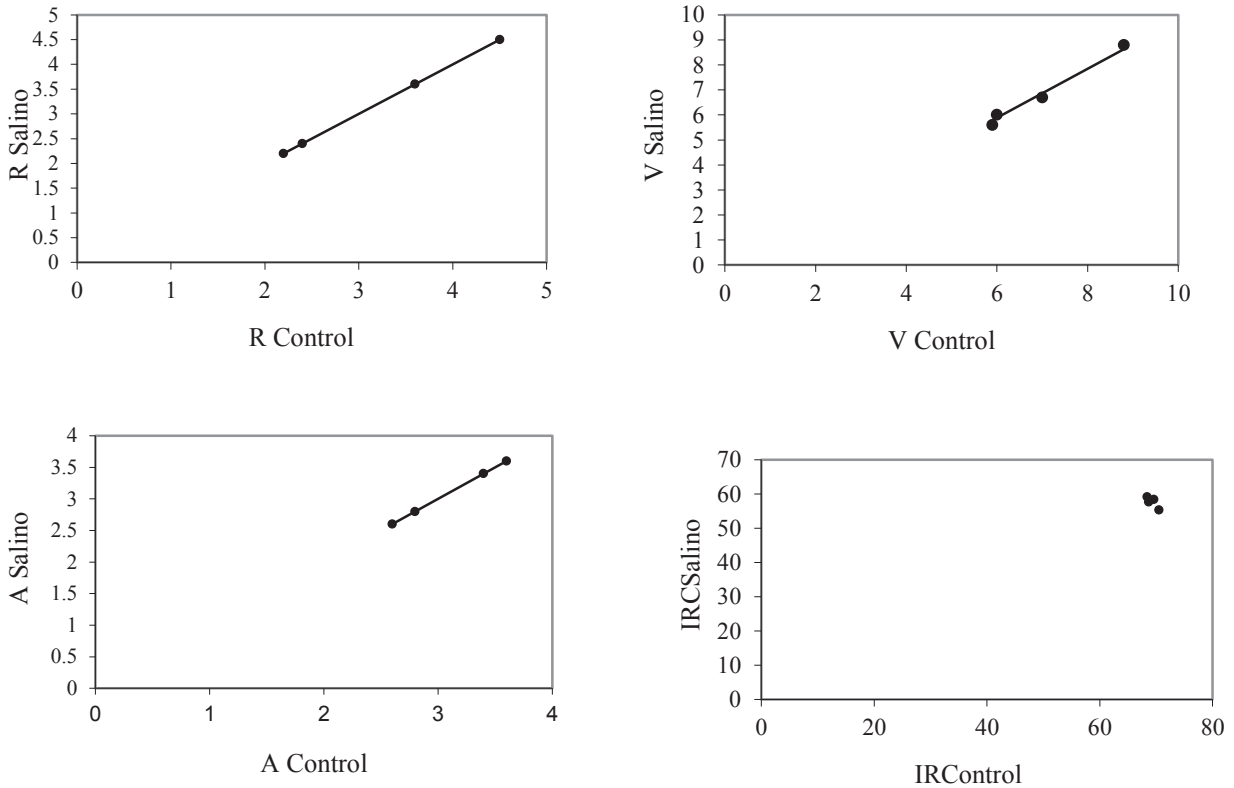


Figura 15. Relación entre las reflectancias (%) del VIS y IRC para el cultivo salino y de control, donde las reflectancias (R = rojo; V = verde; A = azul; IRC = infrarrojo cercano) están en porcentaje.

que los otros niveles estaban sobre la recta horizontal de la Figura 18. Peñuelas *et al.* (1997) muestran una relación lineal entre CEe y CEa, por lo que se pueden intercambiar estos valores en la relación (2) sin que esta se modifique.

De la Figura 19 se tiene que el genotipo 1 es el más tolerante y el genotipo 8 el más sensible. Los rendimientos en el experimento de la cebada, donde los genotipos se sembraron en la misma fecha, fueron evaluados utilizando un mismo día de cosecha.

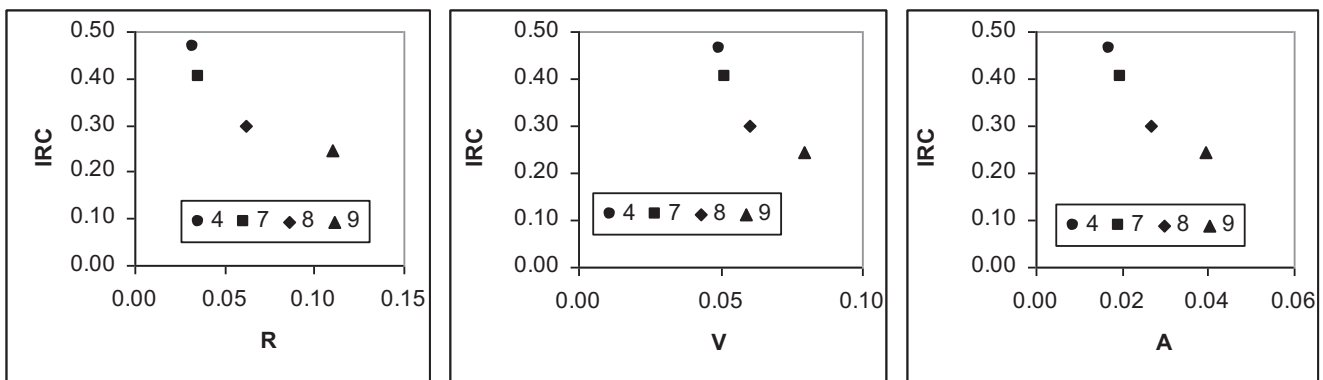


Figura 16. Patrones de la fase 2 del genotipo 1 de cebada en el espacio espectral VIS-IRC, donde las reflectancias (R = rojo; V = verde; A = azul; IRC = infrarrojo cercano) están en proporciones.

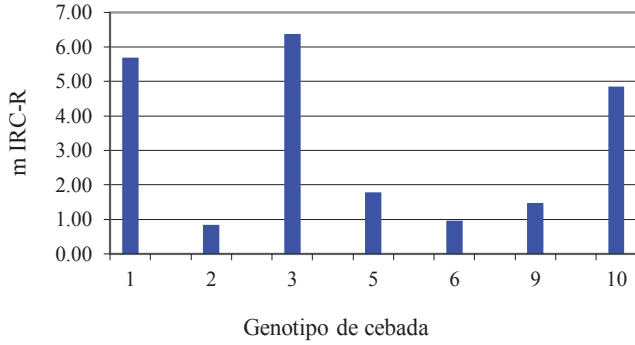


Figura 17. Pendientes m estimadas para la fase 2 de los genotipos de cebada. IRC = infrarrojo cercano; R = rojo.

En el mismo experimento de la cebada se estimó la biomasa aérea de cada genotipo, en la misma fecha que los rendimientos fueron evaluados. La Figura 20 muestra el mismo análisis que se realizó para los rendimientos, donde los parámetros del genotipo 4 fueron estimados de los niveles de salinidad 1, 4 y 8 (0.86, 1.26 y 1.72 dS m⁻¹, respectivamente), dado que la relación ente los niveles 4 y 8 tenía pendiente contraria a la esperada. La relación entre la salinidad del suelo y la biomasa aérea fue supuesta del tipo $Ba = a_1 - b_1 C E_e$, donde Ba es la biomasa aérea en unidades similares a los rendimientos.

La Figura 20 muestra un patrón diferente al de la Figura 19, donde casi todos los genotipos mostraron tolerancias relativas diferentes. Esto es difícil de explicar dada la información escasa sobre el experimento analizado. Una explicación simple es que el índice de cosecha (IC = rendimiento / biomasa aérea) (Charles-Edward, 1982) de los genotipos es diferente.

Si se considera que, a la fecha de la cosecha y estimación de biomasa aérea, los genotipos cultivados estaban en diferentes etapas de senescencia, de acuerdo con el modelo bifásico discutido anteriormente, resulta muy difícil establecer los niveles reales de tolerancia a la salinidad de los genotipos. Lo ideal es utilizar información relativa a un mismo nivel de desarrollo del cultivo para hacer comparaciones. No obstante, estas limitaciones, se puede considerar que las biomasa aérea son un buen estimativo de la tolerancia a la salinidad de los genotipos de la cebada y usar estos patrones como referencia para analizar las reflectancias medidas en la misma etapa de senescencia que las evaluaciones de rendimientos y biomasa aérea.

En la Figura 17 solo se muestran las pendientes m de las reflectancias de los niveles de salinidad 4 y 8. Si se supone un patrón lineal de la reflectancia en la senescencia, representado por $IRC = n - mR$, la Figura 21 muestra las relaciones entre los parámetros de esta relación para los diferentes genotipos usando las reflectancias promedio (3 muestras en cada genotipo). Para los genotipos 4, 7 y 8 se tuvo que utilizar niveles de salinidad definidos previamente de 1, 4, 8; 0, 1, 8; y, 1, 4; respectivamente, dado que las pendientes entre los niveles 4 y 8, usados en los otros genotipos, mostraban una pendiente contraria a la esperada. Los patrones mostrados en la Figura 21 son similares a los de la Figura 15, dada la linealidad ente los parámetros n y m. De esta forma, se pueden usar solo las pendientes de los espacios entre parámetros para evaluar la tolerancia de los cultivos.

Si no se consideran los casos problemáticos de los genotipos 4, 7 y 8, el patrón de la Figura 21 es similar

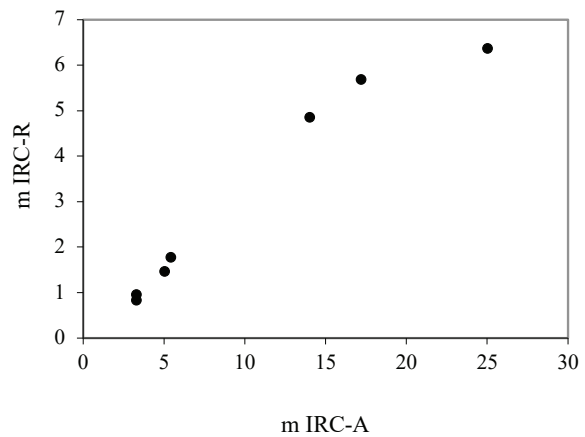
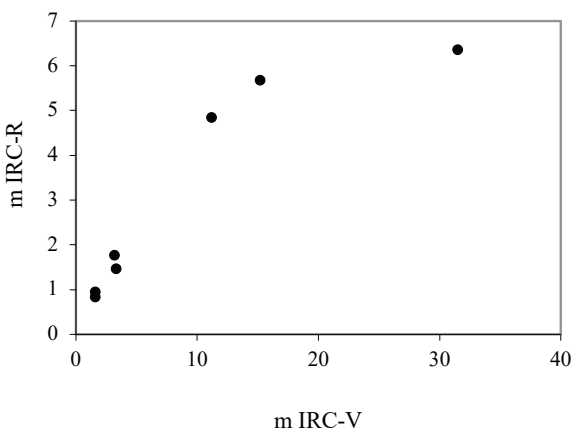


Figura 18. Relación entre las pendientes m de la fase 2 en el espacio espectral VIS-IRC. (R = Rojo, V = Verde, A = Azul e IRC = Infrarrojo cercano).

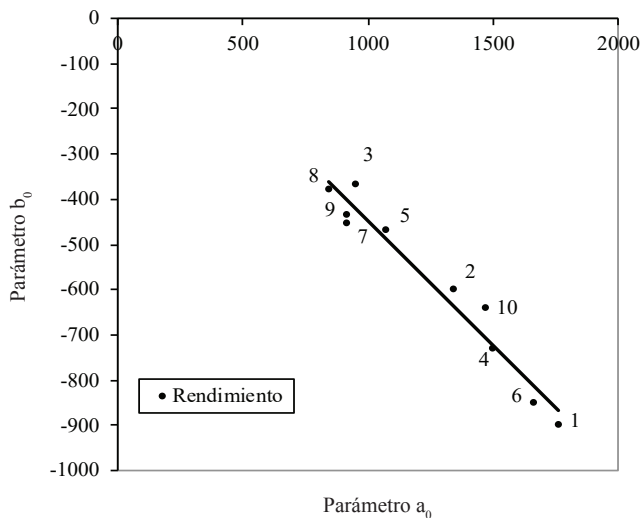


Figura 19. Espacio de los parámetros de la relación salinidad – rendimientos, los parámetros a_0 y b_0 están asociados a la relación (2).

al de las biomazas aéreas, Figura 20; con excepción de los genotipos 3 y 6 que muestran patrones relativos diferentes.

Para revisar si los patrones de la reflectancia no eran debidos a la acción de promediar sus reflectancias, se analizaron las reflectancias individuales (3 muestras por cada nivel de salinidad) y se estimaron los parámetros definidos por la relación $IRC = n - mR$. La Figura 22 muestra los resultados obtenidos, donde para los genotipos 7 y 8 solo se consideraron los niveles de

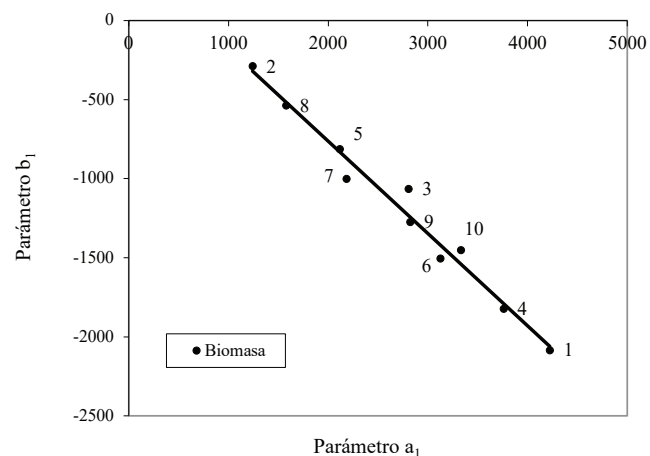


Figura 20. Espacio de los parámetros de la relación salinidad – biomasa aérea.

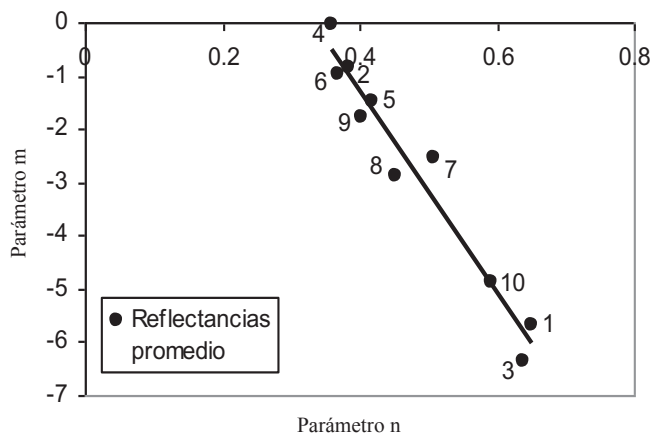


Figura 21. Espacio de los parámetros de la relación del R-IRC (rojo-infrarrojo cercano) promedio.

salinidad 1, 8 y 1, 4; respectivamente, por las mismas razones discutidas para las reflectancias promedio.

La Figura 22 muestra patrones de tolerancia de los cultivos, donde estos son similares al caso de las reflectancias promedio, quitando los genotipos 4, 7 y 8; con excepción de los genotipos 9, 6 y 3 que tienen posiciones relativas diferentes.

De los análisis mostrados para los genotipos de cebada, resulta muy difícil explicar el porqué de los diferentes patrones de tolerancia a la salinidad observados para los rendimientos, biomazas aéreas y reflectancias, pudiendo atribuir estas diferencias a índices de cosecha diferentes entre los genotipos.

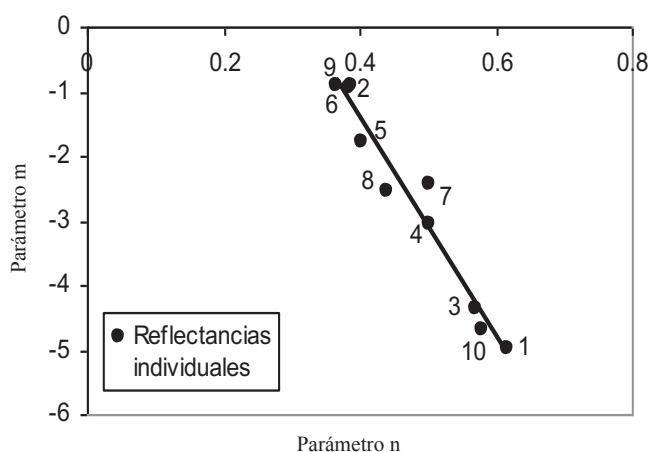


Figura 22. Espacio de los parámetros de la relación del R-IRC (rojo-infrarrojo cercano) individuales.

CONCLUSIONES

- En este trabajo se presentó un marco teórico-conceptual para evaluar los efectos de las sales solubles del suelo sobre los cultivos, usando un modelo bifásico para las reflectancias del dosel. Este modelo fue parcialmente validado con datos de experimentos publicados en la literatura. Los resultados obtenidos son alentadores y abren una nueva forma de analizar el efecto de la salinidad sobre los cultivos, que reduce fuertemente los costos y tiempos implicados en los diseños experimentales convencionales.
- Del análisis de los patrones de tolerancia del experimento de cebada, resulta claro que es necesario realizar estas estimaciones bajo condiciones estandarizadas de estados de desarrollo. Los diferentes patrones de senescencia de los cultivos, inducidos por los tratamientos de salinidad, dificultan la tarea de establecer un patrón estándar de comparación para los rendimientos y biomásas aéreas.
- Las implicaciones del modelo propuesto para el diseño experimental del efecto de la salinidad en los cultivos muestran que existe una ruta muy simple para obtener resultados similares a un experimento convencional de tratamientos de salinidad.

LITERATURA CITADA

- Abadía, A., R. Belkhdja, F. Morales, and J. Abadía. 1999. Effects of salinity on the photosynthetic pigment composition of barley (*Hordeum vulgare* L.) grown under a triple-line-source sprinkler system in the field. *J. Plant. Physiol.* 154: 392-400.
- Abuzar, M., A. McAllister, and M. Morris. 2001. Classification of seasonal images for monitoring irrigated crops in a salinity-affected area of Australia. *Int. J. Remote Sens.* 22: 717-726.
- Abel, G. H. and A. J. MacKenzie. 1964. Salt tolerance of soybean varieties (*Glycine max* L. Merrill) during germination and later growth. *Crop Sci.* 4: 157-161. doi:10.2135/cropsci1964.0011183X000400020010x
- Baret, F. and G. Guyot. 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sens. Environ.* 35: 161-173. doi: 10.1016/0034-4257(91)90009-U.
- Charles-Edwards, D. A. 1982. *Physiological determinants of crop growth.* Academic Press. Sydney, Australia.
- De la Rosa-Ibarra, M. and R. K. Maiti. 1995. Biochemical mechanism in glossy sorghum lines for resistance to salinity stress. *J. Plant Physiol.* 146: 515-519.
- Dionisio-Sese, M. L. and S. Tobita. 2000. Effects of salinity on sodium content and photosynthetic responses of rice seedlings differing in salt tolerance. *J. Plant Physiol.* 157: 54-58.
- Gausman, H. W., W. A. Allen, D. E. Escobar, R. R. Rodríguez, and R. Cardenas. 1971. Age effects of cotton leaves on light reflectance, transmittance, and absorptance and on water content and thickness. *Agron. J.* 63: 465-469.
- Gausman, H. W., P. S. Baur, M. P. Porterfield, and R. Cardenas. 1972. Effects of salt treatments of cotton plants (*Gossypium hirsutum* L.) on leaf mesophyll cells microstructure. *Agron. J.* 64: 133-136.
- Gausman, H. W. and R. Cardenas. 1968. Effect of soil salinity on external morphology of cotton leaves. *Agron. J.* 60: 566-567.
- Gausman, H. W., W. A. Allen, V. I. Myers, and R. Cardenas. 1969. Reflectance and internal structure of cotton leaves, *Gossypium hirsutum* L. *Agron. J.* 61: 374-376.
- Gitelson, A. and M. N. Merzlyak. 1994. Spectral reflectance changes associated with autumn senescence of *Aesculus hippocastanum* L. and *Acer platanoides* L. leaves spectral features and relation to chlorophyll estimation. *J. Plant Physiol.* 143: 286-292.
- Huete, A. 1987. Soil-dependent spectral response in a development plant canopy. *Agron. J.* 79: 61-68.
- Huete, A., C. Justice, and W. van Leeuwen. 1999. MODIS vegetation index (MOD 13) algorithm theoretical basis document version 3. NASA Goddard Space Flight Center. Greenbelt, MD, USA.
- Igartua, E., M. P. Gracia, and J. R. Lasa. 1995. Field responses of grain sorghum to a salinity gradient. *Field Crops Res.* 42: 15-25.
- Isla C., R., R. Aragües, and A. Royo. 1998. Validity of various physiological traits as screening criteria for salt tolerance in barley. *Field Crops Res.* 58: 97-107.
- Jacquemoud, S. 1993. Inversion of the PROSPECT + SAIL canopy reflectance models from AVIRIS equivalent spectra: Theoretical study. *Remote Sens. Environ.* 44: 281-292.
- Jacquemoud, S. and F. Baret. 1990. PROSPECT: A model of leaf optical properties spectra. *Remote Sens. Environ.* 34: 75-91.
- Kauth, R. J. and G. S. Thomas. 1976. The tasseled cap. A graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat. LARS symposia. Paper 159. http://docs.lib.purdue.edu/lars_symp/159/. (Consulta: noviembre 10, 2017).
- Mass, E. V. 1986. Salt tolerance of plants. *Appl. Agric. Res.* 1: 12-26.
- Mass, E. V. 1990. Crop salt tolerance. pp. 262-304. *In:* K. Tanji (ed.). *Agricultural salinity assessment and management.* ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice no. 71. ASCE. New York, NY, USA.
- Mass, E. V. and C. M. Grieve. 1990. Spike and leaf development in salt-stressed wheat. *Crop Sci.* 30: 1309-1313.
- Maas, E. V. and G. J. Hoffman. 1977. Crop salt tolerance – current assessment. *J. Irrig. Drain. Div. Am. Soc. Civ. Eng.* 103: 115-134.
- Munns, R. 1993. Physiological processes limiting plant growth in saline soils: Some dogmas and hypotheses. *Plant Cell Environ.* 16: 15-24.
- Munns, R. and A. Termaat. 1986. Whole-plant responses to salinity. *Aust. J. Plant Physiol.* 13: 143-160.
- Myneni, R. B., J. Ross, and G. Asrar. 1989. A review of the theory of photon transport in leaf canopies in slab geometry. *Agric. For. Meteorol.* 45: 1-165.
- Nieman, R. H. 1965. Expansion of bean leaves and its suppression by salinity. *Plant Physiol.* 40: 156-161.
- Paz, F., E. Palacios, E. Mejía, M. Martínez y L. A. Palacios. 2005. Análisis de los espacios espectrales de la reflectividad del follaje de los cultivos. *Agrociencia* 39: 293-301.
- Paz, F., M. Odi, A. Cano, M. A. Bolaños y A. Zarco. 2009. Equivalencia ambiental en la productividad de la vegetación. *Agrociencia* 43: 635-648.

- Paz, F., M. E. Romero, E. Palacios, M. Bolaños, J. R. Valdez y A. Aldrete. 2015. Alcances y limitaciones de los índices espectrales de la vegetación: análisis de índices de banda ancha. *Terra Latinoamericana* 33: 27-49.
- Peñuelas, J., R. Isla, I. Filella, and J. L. Araus. 1997. Visible and near-infrared reflectance assessment of salinity effects on barley. *Crop Sci.* 37: 198-202.
- Pulido M., L., C. L. Wiegand, C. Rodríguez Zavaleta y S. Neck. 1997. Imágenes de satélite para identificar la salinidad del suelo en los distritos de riego. *Terra* 15: 201-210.
- Richardson, A. J. and C. L. Wiegand. 1977. Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 43: 1541-1552.
- Ross, J. 1981. The radiation regime and architecture of plant stands. W. Junk. Norwell, MA, USA.
- Sionit, N. and P. J. Kramer. 1977. Effect of water stress during different stages of growth of soybean. *Agron. J.* 69: 274-278.
- Thomas, J. R., L. N. Nauken, G. F. Oerther, and R. G. Brown. 1971. Estimating leaf water content by reflectance measurements. *Agron. J.* 63: 845-847.
- Verhoef, W. 1984. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: The SAIL model. *Remote Sens. Environ.* 16: 125-141.
- Wang, D., M. C. Shannon, and C. M. Grieve. 2001. Salinity reduces radiation absorption and use efficiency in soybean. *Field Crops Res.* 69: 267-277.
- Wang, D., C. Wilson, and M. C. Shannon. 2002. Interpretation of salinity and irrigation effects on soybean canopy reflectance in visible and near-infrared spectrum domain. *Int. J. Remote Sens.* 23: 811-824.
- Wiegand, C. L., J. H. Everitt, and A. J. Richardson. 1992. Comparison of multispectral video and SPOT-1 HRV observations for cotton affected by soil salinity. *Int. J. Remote Sens.* 13: 1511-1525.
- Wiegand, C. L., J. D. Rhoades, D. E. Escobar, and J. H. Everitt. 1994. Photographic and videographic observations for determine and mapping the response of cotton to soil salinity. *Remote Sens. Environ.* 48: 1-25.
- Zarco, A., F. Paz, E. Palacios, A. Cano, M. Bolaños, F. Pascual, L. A. Palacios, O. Palacios y J. L. Oropeza. 2008. Modelación del efecto de escala espectral en el sistema suelo-vegetación. *Agrociencia* 42: 193-204.