

Efecto de la humedad y compactación de un Ultisol de la sabana del estado Monagas sobre la concentración de clorofila y carotenoides, lavado de electrolitos y contenido relativo de agua en plantas de soya

María E. Trujillo G.*, Jesús R. Méndez N.*, Américo J. Hossne G.*, Francisco J. Parra D.*

RESUMEN

A finales del año 2008, se realizó un ensayo a nivel de invernadero para determinar el comportamiento de la concentración de clorofila *a*, *b*, *a+b* y carotenoides, el lavado de electrolitos y contenido relativo de agua en el cultivo de Soya, con respecto a la humedad y compactación de un suelo Ultisol, debido a que estos dos factores son una limitante muy común en los suelos agrícolas del estado Monagas. Se trabajó bajo un diseño de bloques al azar en arreglo factorial (4 x 4) donde se estudió la interacción de cuatro niveles de compactación a través de diferentes número de golpes por capa (0, 12, 24, 36) y cuatro niveles de humedad a través de la variación de las frecuencias de riego (todos los días, cada dos días, cada tres días y cada cuatro días), luego del análisis de varianza y posterior análisis de regresión se concluyó que el factor más influyente en las variables evaluadas fue la frecuencia de riego.

ABSTRACT

In late 2008, a greenhouse trial was conducted with soybeans to determine the behavior of chlorophyll *a*, *b*, *a+b* and carotenoid concentration, electrolyte leakage, and relative water content with respect to moisture and ultisol soil compaction, because these two factors are a common limiting factor of agricultural soil in the state of Monagas. A randomized block design with factorial arrangement (4x4) was used, and the interaction of four levels of compaction produced by different number of blows per layer (0, 12, 24, 36) and four levels of moisture produced by varying the irrigation frequency (daily, every two days, every three days and four days) was studied. Analysis of variance and regression analysis indicated that the most influential factor in the variables assessed was the frequency of irrigation.

Recibido: 19 de Agosto de 2010
Aceptado: 4 de Noviembre de 2010

INTRODUCCIÓN

Los suelos de los llanos venezolanos, en las últimas décadas, han sido sometidos a una agricultura básicamente con cultivos intensivos de secano, altamente mecanizados, sin medidas de conservación de suelos, lo que ha traído como consecuencia el deterioro progresivo de sus cualidades físicas, químicas y biológicas (Gutiérrez *et al.*, 2000). Los procesos de degradación de las propiedades físicas de los suelos son los que a nivel mundial se señalan como de mayor importancia económica debido a que condicionan el desarrollo y la penetración de las raíces de los cultivos, factor completamente limitante en el desarrollo de los mismos (Hossne, 2002).

Es también cierto que no solo el grado de compactación y/o resistencia a la penetración del suelo es el factor físico más limitante para el desarrollo radical puesto que el contenido de agua o porcentaje de humedad presente es también sumamente relevante ya que según Hossne (2001) la densidad del suelo varía con el porcentaje de humedad así como también el ángulo de fricción interna de las partículas, de tal manera que la humedad edáfica influye en la penetrabilidad radical, el cual disminuye las acciones de resistencia de los parámetros físicos y terramecánicos. Debido a la importancia desde el punto de vista de la alimentación humana y animal del cultivo de soya y a que los carotenoides son considerados compuestos indispensables para la vida, fundamentalmente

debido a las diferentes funciones que llevan a cabo en relación con la fotosíntesis tal y como se conoce hoy en día (Meléndez *et al.*, 2006), así como también las clorofilas en las plantas son indispensables para su desarrollo debido a que capturan la energía solar necesaria para realizar la fotosíntesis, en vista de esto se hace importante conocer los factores que puedan afectar la concentración de estas ya que es un índice de la actividad fotosintética (Pinheiro *et al.*, 2004) se planteó en el presente ensayo determinar la influencia de diferentes frecuencias de riego y niveles de compactación del suelo sobre las concentraciones de clorofila, carotenoides, el contenido relativo de agua y el lavado de electrolitos.

Palabras clave:

Compactación del suelo, Estrés por humedad, Clorofila en Soya

Keywords:

Soil compaction, Moisture stress, Chlorophyll in soybean plants

* Departamento de Ingeniería Agrícola, Escuela de Ingeniería Agronómica. Núcleo de Monagas, Universidad de Oriente. Maturín, Monagas, Venezuela. Correo electrónico: mariatrujillogalindo@gmail.com.

MÉTODOS

El ensayo se realizó en el invernadero de Postgrado de Agricultura Tropical de la Universidad de Oriente Núcleo de Monagas campus Juanico, ubicado en la ciudad de Maturín sector Juanico, de acuerdo a coordenadas UTM E-482908.31 N-1076748.00 y E-482924.24 N-1076752.51 a 52 m.s.n.m., desarrollado durante el periodo comprendido de Mayo de 2007 y Diciembre de 2008, trabajando con material obtenido de la sabana de Jusepín, en el Estado Monagas de la República Bolivariana de Venezuela, a 147 m.s.n.m., UTM E-451257,00 N-1078422,00 como punto de referencia; con una precipitación anual de 1 127 mm y una temperatura media anual de 27.5 °C. El área está constituida de una vegetación típica de sabana con la predominancia de especies vegetales como: Chaparro (*Curatella americana*), Merrey (*Anacardium occidentale*), Paja peluda (*Trachypogon y Axonopas sp.*), Manteco (*Byrsonima crassifolia*), Mastranto (*Hyptis suaveolens*), gramíneas, ciperáceas, etc. (Espinoza, 1970).

El ensayo se realizó bajo un diseño de bloques al azar en arreglo factorial (4 x 4) con cuatro repeticiones, donde los factores fueron los cuatro niveles de compactación establecidos por diferentes número de golpes por capa (0, 12, 24, 36) y cuatro frecuencias de riego (todos los días, cada dos días, cada tres días y cada cuatro días), estudiando el efecto aislado y la interacción de los mismos. Las unidades experimentales estuvieron conformadas por 64 recipientes de PVC (Polivinil Chloride) de 1.5 cm de espesor, 30 cm de diámetro y 30 cm de profundidad, en los cuales se depositó un volumen de suelo de 0.019 m³/cilindro (24.57 Kg). Una vez recolectadas las muestras disturbadas estas fueron secadas al aire, para luego ser tamizadas a través de un tamiz N° 40 de malla de 0.0165 mm de diámetro, esto con la finalidad de uniformizar el tamaño de las partículas.

Los golpes fueron proporcionados por el método Proctor de compactación a caída libre garantizando que todos los golpes se hicieran con la misma fuerza. Estas variaciones de volúmenes (0 golpes: 18 151.90 cm³, 12 golpes: 17 683.61 cm³; 24 golpes: 17 419.64 cm³, 36 golpes: 17 121.43 cm³) produjeron diferentes densidades ya que el contenido de la masa de suelo en cada cilindro fue el mismo. El cambio del volumen se logró por las diferentes alturas del suelo en cada cilindro por capa. La reducción de volumen se efectuó en tres etapas, reduciendo cada capa de 8.19 Kg de suelo con 0, 12, 24 y 36 golpes respectivos para los niveles de compactación establecidos. La cantidad de agua añadida a todos los cilindros fue de un litro variando las frecuencias de riego para que esto produjera diferentes porcentajes de humedad, los cuales fueron monitoreados usando el método de los bloques de yeso determinando la resistencia eléctrica de los mismos.

Antes de la siembra se aplicó la cantidad de fertilizante en función de 25-100-120 Kg/ha de N-P-K según Solórzano (2005). En total se usaron 320 semillas (5 semillas/cilindro), las cuales fueron inoculadas con el producto de nombre comercial RHIZOPLUS, a base de bacterias fijadoras de nitrógeno *Bradyrhizobium japonicum*, también se les aplicó VITAVAX un fungicida a base de cobre y LEGUMOL un complemento nutricional a base de cobre y molibdeno. Las plantas fueron cosechadas por bloques de tal manera que a los 72 días después de la siembra se cosechó el primero, a los 73 el segundo, a los 74 el tercero y a los 75 el cuarto bloque en un estado reproductivo entre V₅ (5 nudos) y R₂ (floración completa) (Ferh *et al.*, 1991)

Determinación de clorofila y carotenoides

Las concentraciones de clorofila y carotenoides fueron determinadas usando como extractante a la acetona según el método descrito por Lichtenthaler y Wellburn (1983), pero con algunas modificaciones debido a que originalmente se trabaja con muy poco volumen de solución lo que dificulta la toma de lecturas con el espectrofotómetro. Entonces, se decidió trabajar con 22.2 mg de tejido foliar y 5 ml de acetona al 80 %, los tubos de ensayo fueron centrifugados por 10 minutos a 12 000 rpm y luego dejados reposar por una hora a 4 °C en la oscuridad para evitar la foto oxidación de los pigmentos. Luego el sobrenadante fue llevado al espectrofotómetro usando un blanco de acetona al 80 %, en donde se determinó el porcentaje de transmitancia a longitudes de onda de 663 nm, 646 y 470 nm. Luego estos valores fueron introducidos en las siguientes fórmulas:

$$Chla(\mu\text{g/ml}) = 12.21 E_{663} - 2.81 E_{646}$$

$$Chlb(\mu\text{g/ml}) = 20.13 E_{646} - 25.03 E_{663}$$

$$Cr(\mu\text{g/ml}) = \frac{1000 E_{470} - 3.27 Chla - 104 Chlb}{229}$$

$$Chla(\mu\text{g/g}) = \frac{Chla(\mu\text{g/ml})}{4.44}$$

$$Chlb(\mu\text{g/g}) = \frac{Chlb(\mu\text{g/ml})}{4.44}$$

$$Cr(\mu\text{g/g}) = \frac{Cr(\mu\text{g/ml})}{4.44}$$

$$Chla(\mu\text{g/g}) = \frac{Chla(\mu\text{g/g})}{\% \text{ hojas}} \times 100$$

$$Chlb(\mu\text{g/g}) = \frac{Chlb(\mu\text{g/g})}{\% \text{ hojas}} \times 100$$

$$Cr(\mu\text{g/g}) = \frac{Cr(\mu\text{g/g})}{\% \text{ hojas}} \times 100$$

$$\text{Relación} = \frac{Chlb(\mu\text{g/ml})}{Chla(\mu\text{g/ml})}$$

Donde:

- Chla:** Contenido de clorofila *a*
- Chlb:** Contenido de clorofila *b*
- Cr:** Contenido de carotenoides
- %w:** Porcentaje de humedad foliar

Determinación del contenido relativo de agua

Para el contenido relativo de agua se tomaron cinco hojas al azar de cada cilindro y se les determinó la masa fresca inmediatamente de cosechadas, luego se sumergieron por doce horas en recipientes con agua destilada para determinar la masa túrgida, y luego fueron llevadas a estufa a 72 °C hasta obtener una masa constante (masa seca). El contenido relativo de agua se determinó de acuerdo a Kramer (1974) mediante la fórmula:

$$CRA = \frac{MF - MS}{MT - MS} \times 100$$

Donde:

- CRA:** contenido relativo de agua
- MF:** masa fresca foliar
- MS:** masa seca foliar
- MT:** masa túrgida foliar

Determinación del lavado de electrolitos

El lavado de electrolitos se determinó mediante el método descrito por Lutts *et al.*, (1996), en donde se tomaron 20 mg de tejido foliar en forma de discos que fueron depositados en tubos de ensayo junto con 10 ml de agua desionizada e incubados con agitación leve (100 rpm) y constante a 25 °C por 24 horas; posteriormente se determinó la conductividad eléctrica a la solución expresada en $\mu\text{s}/\text{cm}$ (Lt); luego se llevaron al autoclave a 120 °C por 20 min, se esperó a que la temperatura se estabilizara en 25 °C y se determinó nuevamente la conductividad eléctrica a la solución (LO). Entonces el porcentaje de lavado de electrolitos fue determinado por la expresión:

$$\% \text{Lavado} = \frac{Lt (\mu\text{s} / \text{cm})}{LO (\mu\text{s} / \text{cm})} \times 100$$

Donde:

- % Lavado:** porcentaje de lavado de electrolitos
- Lt:** conductividad eléctrica de la solución antes de ser llevado al autoclave
- LO:** conductividad eléctrica de la solución luego de ser llevado al autoclave

Luego de realizar el análisis de varianza de bloques al azar en arreglo factorial (4 x 4) con un nivel de significancia de 0.05 a cada una de las variables, se aplicó un análisis de regresión a aquellas donde se encontraron diferencias significativas en el análisis de varianza, esto realizado con el programa estadístico Statistical Program Social Science (SPSS Statistical versión 17.0) que nos proporcionó las ecuaciones de regresión con su coeficiente de regresión, con las cuales se realizaron las gráficas; y en donde la interacción de los factores fue significativa se realizó un análisis de superficie de respuesta que fue realizado con el programa Statgraphics y para el resto de las gráficas la aplicación de Microsoft office, Excel 2007.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Lavado de electrolitos y contenido relativo de agua

Para el lavado de electrolitos y el contenido relativo de agua no se presentaron diferencias significativas entre los tratamientos debido a la acción de los factores aislados ni por la combinación de los mismos, presentándose un promedio general de 81.14 % con un coeficiente de variación del 21.84 % y un promedio general de 51.95 % con un coeficiente de variación del 18.60 % respectivamente, tal como se muestran en las tablas 1 y 2.

Sin estrés y sin daño las células vegetales mantienen los electrolitos dentro de las membranas; como las células son sometidas a estrés se lavan los electrolitos circundantes al tejido, por lo que una estimación del daño celular puede hacerse comparando mediante la conductividad eléctrica el contenido de electrolitos en un medio acuoso antes y después de haberse sometido a estrés (McNabb y Takahashi, 2000), es por ello que mientras menor sea el porcentaje de lavado de electrolitos más estables son las membranas de las células y se puede asumir que las plantas no estuvieron bajo un estrés por temperatura o estrés hídrico prolongado o son resistentes a dicha condición, por lo que en el ensayo se obtuvieron

Tabla 1.

Análisis de varianza de bloques al azar en arreglo factorial (4 x 4) para el lavado de electrolitos de hojas en plantas de Soya bajo cuatro frecuencias de riego y cuatro niveles de compactación de un suelo Ultisol.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados medios	FC	FT	Significancia
Bloques	3	486.34	162.11	0.44	2.86	ns
Frecuencia de riego	3	1342.50	447.50	1.21	2.86	ns
Compactación	3	819.48	273.16	0.74	2.86	ns
Frecuencia * Compac	9	2923.90	324.88	0.88	2.14	ns
Error Exp.	45	16680.30	370.67			
Variación total	63	22252.52	353.21			
Media General		88.14 %				
Coefficiente de Variación		21.84 %				

Tabla 2.

Análisis de varianza de bloques al azar en arreglo factorial (4 x 4) para el contenido relativo de agua en hojas en plantas de Soya bajo cuatro frecuencias de riego y cuatro niveles de compactación de un suelo Ultisol.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados medios	FC	FT	Significancia
Bloques	3	7 875.99	2 625.33	28.13	2.86	*
Frecuencia de riego	3	281.24	93.75	1.00	2.86	ns
Compactación	3	367.72	122.57	1.31	2.86	ns
Frecuencia * Compac	9	1 151.25	127.92	1.37	2.14	ns
Error Exp.	45	4 199.36	93.32			
Variación total	63	13 875.56	220.25			
Media General	51.95					
Coefficiente de Variación	18.60 %					

Tabla 3.

Análisis de varianza de bloques al azar en arreglo factorial (4 x 4) y análisis de regresión para la concentración de clorofila a en µg/ml en plantas de Soya bajo cuatro frecuencias de riego y cuatro niveles de compactación de un suelo Ultisol.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados medios	FC	FT	Significancia
Bloques	3	231.82	77.27	5.99	2.86	*
Frecuencia de Riego	3	436.08	145.34	11.27	2.86	*
R. Lineal	1	396.56	396.56	30.75	4.10	*
R. Cuadrática	1	3.52	3.52	0.27	4.10	ns
R. Cúbica	1	35.92	35.92	2.78	4.10	ns
Compactación	3	16.43	5.48	0.42	2.86	ns
Frecuencia* Compac	9	240.45	26.72	2.07	2.14	ns
Error Exp.	45	580.40	12.90			
Variación Total	63	1 505.17	23.89			
Media General	10.22					
Coefficiente de Variación	35.14 %					

porcentajes considerablemente altos alrededor del 80 % lo que es índice de que las plantas estuvieron sometidas a algún tipo de estrés durante el desarrollo del ensayo.

Concentración de clorofila (a) en µg/ml

Meléndez *et al.*, (2006) quienes encontraron que en suelos inundados la concentración de clorofila fue mayor que en suelos aireados coinciden con los resultados obtenidos en el ensayo donde en la presente tabla 3 se muestra el análisis de varianza para la concentración de clorofila a, donde resultaron diferencias significativas para el factor frecuencia de riego por lo que se procedió a realizar el análisis de regresión presentado en la Figura 1 donde se observa el comportamiento creciente y lineal de la concentración de clorofila a en función de la variación de las frecuencias de riego, de acuerdo a la ecuación lineal arrojada por el análisis de regresión, $Y = 4.655 + 2.227x$ con un $r^2 = 90.94\%$, lo que se traduce en un aumento de la concentración de clorofila (a) junto con la disminución de la humedad del suelo.

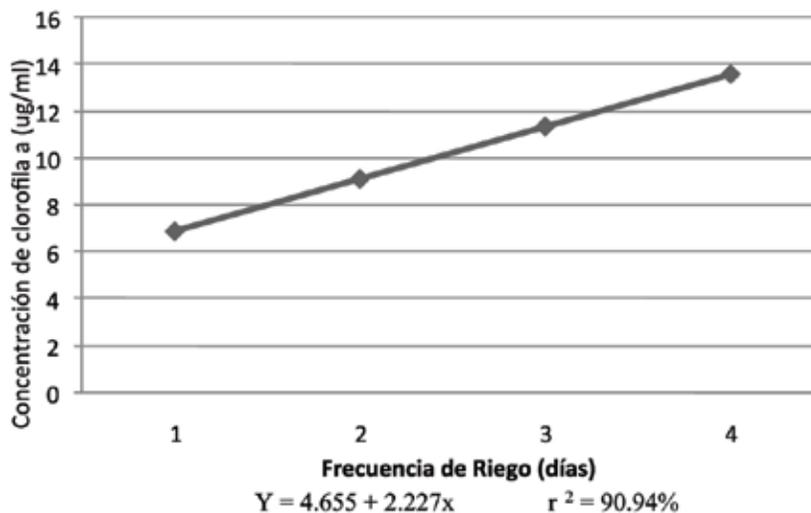


Figura 1. Comportamiento de la concentración de clorofila a en función de la variación de las cuatro frecuencias de riego establecidas.

Tabla 4.

Análisis de varianza de bloques al azar en arreglo factorial (4 x 4) y análisis de regresión para la concentración de clorofila *a* en $\mu\text{g/g}$ masa fresca en plantas de Soya bajo cuatro frecuencias de riego y cuatro niveles de compactación de un suelo Ultisol.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados medios	FC	FT	Significancia
Bloques	3	11.76	3.92	5.99	2.86	*
Frecuencia de riego	3	22.12	7.37	11.27	2.86	*
R. Lineal	1	20.24	20.24	30.94	4.10	*
R. Cuadrática	1	0.25	0.25	0.38	4.10	ns
R. Cúbica	1	1.78	1.78	2.71	4.10	ns
Compactación	3	0.83	0.28	0.42	2.86	ns
Frecuencia* Compac	9	12.20	1.36	2.07	2.14	ns
Error Exp.	45	29.44	0.65			
Variación Total	63	76.35	1.21			
Media General	2.30					
Coefficiente de Variación	35.17 %					

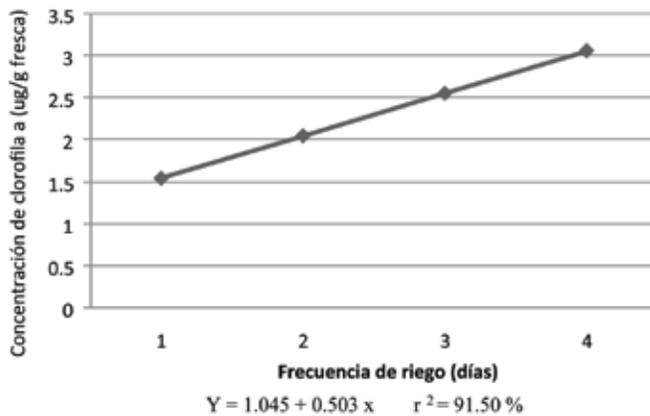


Figura 2. Comportamiento de la concentración de clorofila *a* en función de la variación de las cuatro frecuencias de riego establecidas.

Concentración de clorofila *a* en $\mu\text{g/g}$ masa fresca

A continuación se muestra en la tabla 4 el análisis de varianza para la concentración de clorofila *a* expresada en $\mu\text{g/g}$ masa fresca, donde resultaron diferencias significativas para el factor frecuencia de riego. En la Figura 2, se evidencia el comportamiento creciente y lineal de la concentración de clorofila (*a*) expresada en $\mu\text{g/g}$ masa fresca, en función de la variación de las frecuencias de riego, de acuerdo a la ecuación lineal arrojada por el análisis de regresión, $Y = 1.045 + 0.503 x$ con un $r^2 = 91.50 \%$, lo que se traduce en un aumento de la concentración de clorofila (*a*) junto con la disminución de la humedad del suelo.

Concentración de clorofila *a* en $\mu\text{g/g}$ masa seca

Para la concentración de clorofila (*a*) expresada en $\mu\text{g/g}$ masa seca, el análisis de varianza de regresión para bloques al azar en arreglo factorial (4 x 4), no arrojó diferencias significativas entre los tratamientos, por efecto de los factores ni aislados ni de su interacción tal como se muestra en la presente tabla 5.

Tabla 5.

Análisis de varianza de bloques al azar en arreglo factorial (4 x 4) y análisis de regresión para la concentración de clorofila *a* en $\mu\text{g/g}$ masa seca en plantas de Soya bajo cuatro frecuencias de riego y cuatro niveles de compactación de un suelo Ultisol.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados medios	FC	FT	Significancia
Bloques	3	351.88	117.29	11.95	2.86	*
Frecuencia de riego	3	51.91	17.30	1.76	2.86	ns
Compactación	3	35.91	11.97	1.22	2.86	ns
Frecuencia* Compac	9	82.02	9.11	0.93	2.14	ns
Error Exp.	45	441.68	9.82			
Variación Total	63	963.40	15.29			
Media General	4.18					
Coefficiente de Variación	74.95 %					

Concentración de clorofila b en µg/ml

En cuanto a la concentración de clorofila (b) expresada en µg/ml se observa el análisis de varianza en tabla 6, resultando de igual manera significativo para el factor frecuencia de riego mostrándose un aumento en función de la variación de las frecuencias de riego, de acuerdo a la ecuación lineal $Y = 1.490 + 0.991 x$ con un $r^2 = 99.20 \%$, tal como se muestra en la Figura 3.

Concentración de clorofila b en µg/g masa fresca

De igual manera la concentración de clorofila b expresada en µg/g masa fresca presentó diferencias significativas debido al factor frecuencia de riego (Tabla 7) presentando un aumento lineal de la concentración a medida que se aumentan los días entre un riego y otro, de acuerdo a la ecuación lineal $Y = 1.48 + 0.993 x$ con un $r^2=99.37 \%$, tal como se evidencia en la Figura 4.

Concentración de clorofila b en µg/g masa seca

Presentándose un resultado similar al resto de los parámetros expresados en µg/g masa seca, la clorofila (b) no arrojó diferencias significati-

Tabla 6.

Análisis de varianza de bloques al azar en arreglo factorial (4 x 4) y análisis de regresión para la concentración de clorofila b en µg/ml en plantas de Soya bajo cuatro frecuencias de riego y cuatro niveles de compactación de un suelo Ultisol.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados medios	FC	FT	Significancia
Bloques	3	87.74	29.25	3.34	2.86	*
Frecuencia de riego	3	79.20	26.40	3.02	2.86	*
R. Lineal	1	78.57	78.57	8.98	4.10	*
R. Cuadrática	1	0.49	0.49	0.06	4.10	ns
R. Cúbica	1	0.15	0.15	0.02	4.10	ns
Compactación	3	13.17	4.39	0.50	2.86	ns
Frecuencia* Compac	9	143.90	15.99	1.83	2.14	ns
Error Experimental	45	393.72	8.75			
Variación Total	63	717.74	11.39			
Media General	3.97					
Coefficiente de Variación	74.51 %					

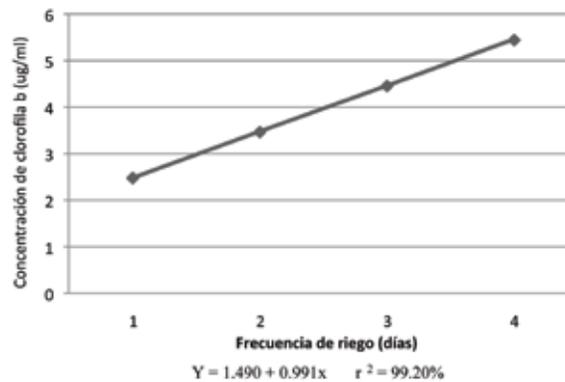


Figura 3. Comportamiento de la concentración de clorofila b en función de la variación de las cuatro frecuencias de riego establecidas.

Tabla 7.

Análisis de varianza de bloques al azar en arreglo factorial (4 x 4) y análisis de regresión para la concentración de clorofila b en µg/g masa fresca en plantas de Soya bajo cuatro frecuencias de riego y cuatro niveles de compactación de un suelo Ultisol.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados medios	FC	FT	Significancia
Bloques	3	87.27	29.09	3.32	2.86	*
Frecuencia de riego	3	79.38	26.46	3.02	2.86	*
R. LINEAL	1	78.88	78.88	8.99	4.10	*
R. CUADRÁTICA	1	0.44	0.44	0.05	4.10	ns
R. CÚBICA	1	0.06	0.06	0.01	4.10	ns
COMPACTACIÓN	3	13.31	4.44	0.51	2.86	ns
FRECUENCIA* COMPAC	9	144.74	16.08	1.83	2.14	ns
ERROR EXPERIMENTAL	45	394.71	8.77			
VARIACIÓN TOTAL	63	719.41	11.42			
Media General	3.96					
Coefficiente de Variación	74.79 %					

vas entre los tratamientos por efecto de ninguno de los factores así como tampoco de la interacción de los mismos, obteniéndose un promedio general de 1.60 µg/g masa seca con un coeficiente de variación del 91.75 %, mostrado en la presente tabla 8.

Meléndez *et al.*, (2006) encontraron que la inundación disminuye el área foliar y el nivel de clorofila en plantas de maíz, coincidiendo con los resultados obtenidos en este ensayo ya que en suelos inundados el espacio poroso se ve ocupado en su totalidad por agua desplazando el oxígeno presente en el suelo, situación que se presentó también en el tratamiento de mayor compactación y mayor porcentaje de humedad, donde la porosidad es menor que en el resto al igual que el contenido de oxígeno.

Los requerimientos de aireación de plantas que crecen en el suelo aumentan con la temperatura. El crecimiento de las raíces es particularmente sensible a las condiciones de aireación. La razón probablemente sea que la velocidad de respiración (y por lo tanto el consumo de O₂) es mayor en los ápices radiculares, donde ocurre el crecimiento. A pesar de que la compactación no produjo diferencias significativas entre los tratamientos, se pudo producir problemas de aireación debido a la predominancia de microporos en el suelo que trajo como consecuencia que al aumentar el contenido de agua estos microporos fueron saturados de agua reduciendo la capacidad de aireación del suelo, y limitando muchas de las funciones metabólicas de las plantas (Jaramillo, 2002), al respecto Rodríguez y Ramírez (1986) reportan que la difusión del oxígeno en el suelo es considerado el proceso físico más importante en

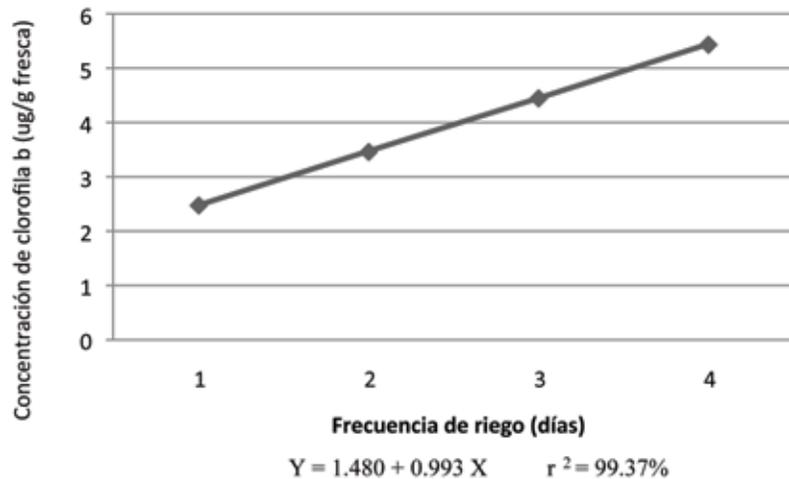


Figura 4. Comportamiento de la concentración de clorofila b en función de la variación de las cuatro frecuencias de riego establecidas.

Tabla 8.

Análisis de varianza de bloques al azar en arreglo factorial (4 x 4) y análisis de regresión para la concentración de clorofila b en µg/g masa seca en plantas de Soya bajo cuatro frecuencias de riego y cuatro niveles de compactación de un suelo Ultisol.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados medios	FC	FT	Significancia
Bloques	3	54.86	18.29	8.48	2.86	*
Frecuencia de riego	3	9.40	3.13	1.45	2.86	ns
Compactación	3	6.11	2.04	0.95	2.86	ns
Frecuencia* Compac	9	16.39	1.82	0.85	2.14	ns
Error Experimental	45	96.98	2.16			
Variación Total	63	183.74	2.92			
Media General	1.60					
Coefficiente de Variación	91.75 %					

la suplencia de oxígeno a la rizósfera y que en condiciones normales, esta difusión en la interfase líquida-gaseosa es baja; cuando la fase líquida predomina sobre la gaseosa, la difusión es aún más baja y que cuando por alguna circunstancia los niveles de dicho elemento en el suelo son deprimidos, la actividad respiratoria y metabólica de las plantas son inhibidas afectando todos los procesos vitales que determinan su desarrollo y crecimiento.

Concentración de clorofila a+b en µg/ml

Para la concentración de clorofila (a+b) expresada en µg/ml se muestra la tabla 9 del análisis de varianza, donde resultó significativo la interacción de los factores, por lo que se procedió a realizar la superficie de respuesta mostrada en la Figura 5, donde se observa que el mejor comportamien-

Tabla 9.

Análisis de varianza de bloques al azar en arreglo factorial (4 x 4) y análisis de regresión para la concentración de clorofila a+b en µg/ml en plantas de Soya bajo cuatro frecuencias de riego y cuatro niveles de compactación de un suelo Ultisol.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados medios	FC	FT	Significancia
Bloques	3	582.90	194.30	6.46	2.84	*
HUMEDAD	3	870.92	290.31	9.65	2.84	*
COMPACTACIÓN	3	58.81	19.60	0.65	2.84	ns
HÚMEDAD * COMPAC	9	687.12	76.35	2.54	2.12	*
C1 en H	3	8.83	2.94	0.10	2.84	ns
R. LINEAL	1	0.31	0.31	0.01	4.08	ns
R. CUADRÁTICA	1	0.71	0.71	0.02	4.08	ns
R. CÚBICA	1	8.52	8.52	0.28	4.08	ns
C2 en H	3	185.74	61.91	2.06	2.84	ns
R. LINEAL	1	24.29	24.29	0.81	4.08	ns
R. CUADRÁTICA	1	120.33	120.33	4.00	4.08	ns
R. CÚBICA	1	161.46	161.46	5.37	4.08	*
C3 en H	3	254.15	84.72	2.82	2.84	ns
R. LINEAL	1	63.23	63.23	2.10	4.08	ns
R. CUADRÁTICA	1	190.92	190.92	6.35	4.08	*
R. CÚBICA	1	190.92	190.92	6.35	4.08	*
C4 en H	3	567.81	189.27	6.29	2.84	*
R. LINEAL	1	183.01	183.01	6.09	4.08	*
R. CUADRÁTICA	1	183.18	183.18	6.09	4.08	*
R. CÚBICA	1	384.79	384.79	12.79	4.08	*
ERROR EXPERIMENTAL	45	1 353.38	30.08			
VARIACIÓN TOTAL	63	3 553.13	56.40			
Media General	14.19					
Coefficiente de Variación	38.65 %					

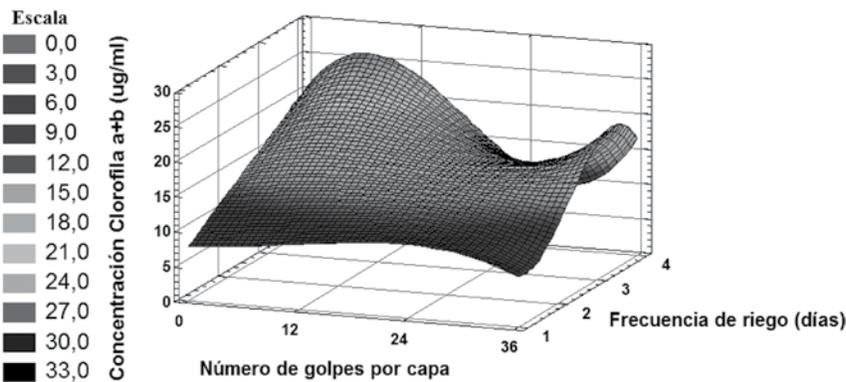


Figura 5. Superficie de respuesta de la concentración de clorofila a+b en función de la variación de las frecuencias de riego en combinación con los diferentes números de golpes.

to se obtuvo hacia los tratamientos de cero y doce número de golpes y frecuencia de riego de cada cuatro días, también se nota que la concentración tiende a aumentar al disminuir el porcentaje de humedad sin mucha variación con respecto al nivel de compactación, en función de la ecuación $Z = 3.591 + 4.251 y + 0.027 xy^3 + 0.0004 x^3y^2 - 0.003 x^2y^3 - 0.0008 x^3y + 0.0162 x^2$ con un $r^2 = 81.44 \%$.

Concentración de clorofila a+b en µg/g masa fresca

De igual manera resultó para la concentración de clorofila (a+b) ex-

presada en $\mu\text{g/g}$ masa fresca significativa la interacción de los factores, por lo que en la Figura 6 se muestra la superficie de respuesta y en la tabla 10 el análisis de varianza, y se puede observar que el mejor comportamiento se obtuvo hacia los tratamientos de cero y doce número de golpes y frecuencia de riego de cada cuatro días y también que la concentración tiende a aumentar al disminuir el porcentaje de humedad sin mucha variación con respecto al nivel de compactación. De acuerdo a la ecuación $Z = 1.453 + 0.781y + 0.004xy^3 + 0.00004x^3y^2 - 0.00039x^2y^3 - 0.000057x^3y$ con un $r^2 = 75.83\%$.

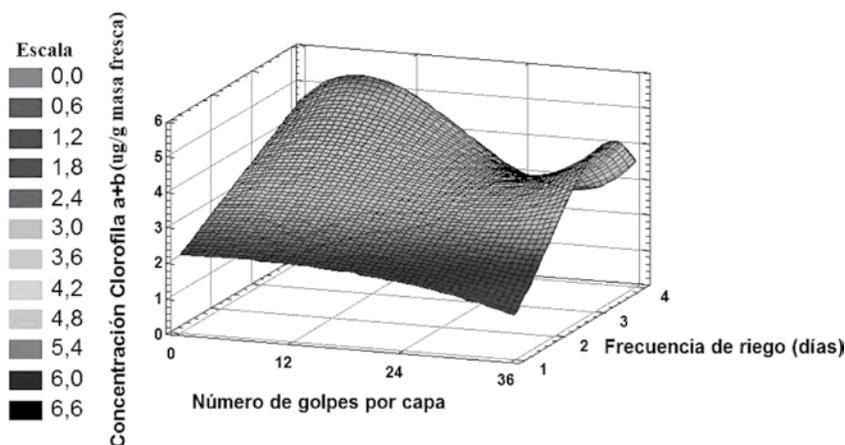


Figura 6. Comportamiento de la concentración de clorofila *a+b* en función de la variación de las frecuencias de riego en combinación con los diferentes números de golpes.

Tabla 10.

Análisis de varianza de bloques al azar en arreglo factorial (4 x 4) y análisis de regresión para la concentración de clorofila *a+b* en $\mu\text{g/g}$ masa fresca en plantas de Soya bajo cuatro frecuencias de riego y cuatro niveles de compactación de un suelo Ultisol.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados medios	FC	FT	Significancia
Bloques	3	29.94	9.98	6.63	2.84	*
HUMEDAD	3	43.70	14.57	9.68	2.84	*
COMPACTACIÓN	3	2.87	0.96	0.64	2.84	ns
HUMEDAD * COMPAC	9	33.94	3.77	2.51	2.12	*
C1 en H	3	0.45	0.15	0.10	2.84	ns
R. LINEAL	1	0.02	0.02	0.01	4.08	ns
R. CUADRÁTICA	1	0.04	0.04	0.02	4.08	ns
R. CÚBICA	1	0.43	0.43	0.29	4.08	ns
C2 en H	3	8.12	2,71	1.80	2.84	ns
R. LINEAL	1	0.91	0.91	0.60	4.08	ns
R. CUADRÁTICA	1	5.28	5.28	3.51	4.08	ns
R. CÚBICA	1	7.21	7.21	4.79	4.08	*
C3 en H	3	12.93	4.31	2.87	2.84	ns
R. LINEAL	1	3.22	3.22	2.14	4.08	ns
R. CUADRÁTICA	1	9.72	9.72	6.46	4.08	*
R. CÚBICA	1	9.72	9.72	6.46	4.08	*
C4 en H	3	28.86	9.62	6.39	2.84	*
R. LINEAL	1	9.30	9.30	6.18	4.08	*
R. CUADRÁTICA	1	9.31	9.31	6.19	4.08	*
R. CÚBICA	1	19.56	19.56	13.00	4.08	*
ERROR EXPERIMENTAL	45	67.72	1.50			
VARIACIÓN TOTAL	63	178.16	2.83			
Media General	3.20					
Coefficiente de Variación	38.33 %					

Estos resultados confirman lo anteriormente expuesto acerca de la influencia de la porosidad o del espacio aerífero disponible ya que al haber un menor porcentaje de humedad sin llegar a causar un estrés hídrico en la planta queda en el suelo mayor espacio para que sea ocupado por el oxígeno que necesitan las plantas para realizar muchas de sus funciones fisiológicas y metabólicas lo cual se evidenció al afectar la concentración de clorofila (*a+b*) (Meléndez *et al.*, 2006).

Concentración de clorofila *a+b* en $\mu\text{g/g}$ masa seca

La concentración de clorofila (*a+b*) en función de la masa seca no se vio afectada (Tabla 11) lo que se debe a que la humedad del suelo incide sobre la humedad foliar y esta a su vez está más relacionada con la concentración de clorofila (*a+b*), comportamiento que también se presentó para la clorofila *a*, *b* y carotenoides.

Concentración de carotenoides en $\mu\text{g/ml}$

Con respecto a la concentración de carotenoides expresada en $\mu\text{g/ml}$ presentó diferencias significativas para el factor frecuencia de riego, tal como se muestra en la tabla 12, mostrando el comportamiento de que aumenta junto con los días entre un riego y otro de manera lineal y progresiva, siguiendo la ecuación de regresión $Y = 1.01 + 0.338 x$ con un $r^2 = 93.19\%$ representada en la Figura 7.

Concentración de carotenoides en $\mu\text{g/g}$ masa fresca

En la tabla 13 se muestra el análisis de varianza para la concentración de carotenoides ($\mu\text{g/g}$ masa fresca) y se observa que resultaron diferencias significativas para el factor frecuencia de riego por lo

Tabla 11.

Análisis de varianza de bloques al azar en arreglo factorial (4 x 4) y análisis de regresión para la concentración de clorofila *a+b* en $\mu\text{g/g}$ masa seca en plantas de Soya bajo cuatro frecuencias de riego y cuatro niveles de compactación de un suelo Ultisol.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados medios	FC	FT	Significancia
Bloques	3	679.35	226.45	11.68	2.86	*
Frecuencia de riego	3	104.60	34.87	1.80	2.86	ns
Compactación	3	69.69	23.23	1.20	2.86	ns
Frecuencia* Compac	9	151.72	16.86	0.87	2.14	ns
Error Experimental	45	872.67	19.39			
Variación Total	63	1878.02	29.81			
Media General	5.77					
Coefficiente de Variación	76.32 %					

Tabla 12.

Análisis de varianza de bloques al azar en arreglo factorial (4 x 4) y análisis de regresión para la concentración de carotenoides en $\mu\text{g/ml}$ en plantas de Soya bajo cuatro frecuencias de riego y cuatro niveles de compactación de un suelo Ultisol.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados medios	FC	FT	Significancia
Bloques	3	1.58	0.53	0.48	2.86	ns
Frecuencia de riego	3	9.81	3.27	3.00	2.86	*
R. Lineal	1	9.14	9.14	8.40	4.10	*
R. Cuadrática	1	0.04	0.04	0.04	4.10	ns
R. Cúbica	1	0.63	0.63	0.58	4.10	ns
Compactación	3	0.36	0.12	0.11	2.86	ns
Frecuencia* Compac	9	7.95	0.88	0.81	2.14	ns
Error Experimental	45	48.98	1.09			
Variación Total	63	68.68	1.09			
Media General	1.86					
Coefficiente de Variación	56.09 %					

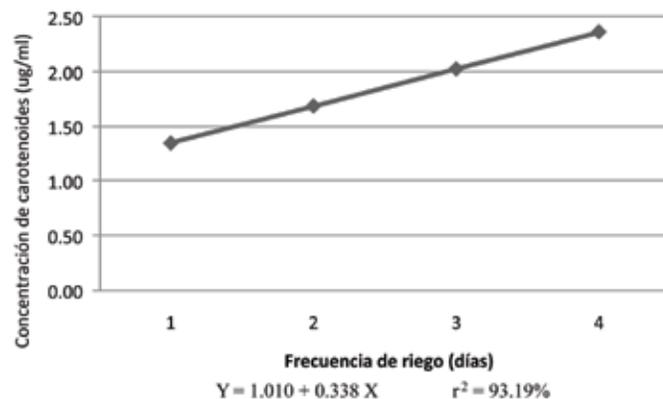


Figura 7. Comportamiento de la concentración de carotenoides en función de la variación de las cuatro frecuencias de riego establecidas.

Tabla 13.

Análisis de varianza de bloques al azar en arreglo factorial (4 x 4) y análisis de regresión para la concentración de carotenoides en $\mu\text{g/g}$ masa fresca en plantas de Soya bajo cuatro frecuencias de riego y cuatro niveles de compactación de un suelo Ultisol.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados medios	FC	FT	Significancia
Bloques	3	0.10	0.03	0.61	2.86	ns
Frecuencia de riego	3	0.56	0.19	3.33	2.86	*
R. Lineal	1	0.50	0.50	8.94	4.10	*
R. Cuadrática	1	0.00	0.00	0.01	4.10	ns
R. Cúbica	1	0.06	0.06	1.05	4.10	ns
Compactación	3	0.01	0.00	0.07	2.86	ns
Frecuencia* Compac	9	0.46	0.05	0.91	2.14	ns
Error Experimental	45	2.51	0.06			
Variación Total	63	3.64	0.06			
Media General	0.41					
Coefficiente de Variación	57.64 %					

que en la figura 8 se puede observar cómo la concentración de carotenoides ($\mu\text{g/g}$ masa fresca) aumenta a medida que aumentan los días entre un riego y otro de manera lineal y progresiva, de acuerdo a la ecuación de regresión $Y = 0.215 + 0.079 x$ con $r^2 = 88.08 \%$

Concentración de carotenoides en $\mu\text{g/g}$ masa seca

Finalmente tanto para la concentración de carotenoides expresados en $\mu\text{g/g}$ masa seca como para la relación clorofila a y b, no se mostraron diferencias significativas entre los tratamientos por efecto de alguno de los factores o su interacción, obteniéndose un promedio de $0.73 \mu\text{g/g}$ masa seca con un coeficiente de variación de 72.70% (tabla 14) y una relación de $1:0.38 \mu\text{g/ml}$ con un coeficiente de variación del 63.00% respectivamente (tabla 15).

Jamil *et al.*, (2007) reportan que cuando las plantas crecen bajo

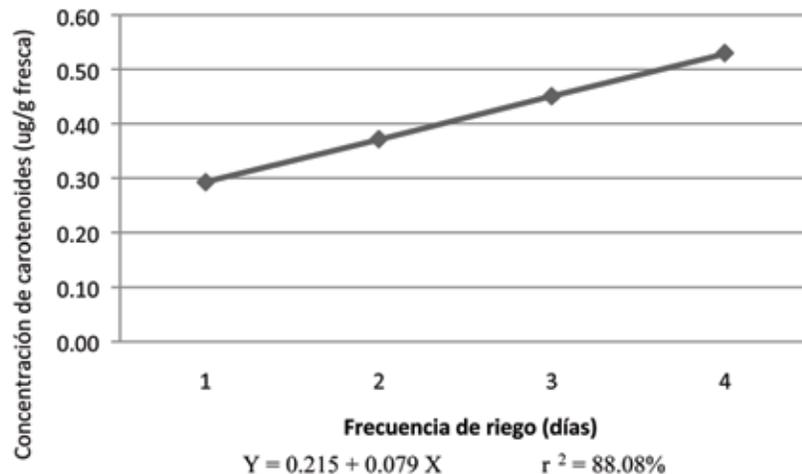


Figura 8. Comportamiento de la concentración de carotenoides en función de la variación de las cuatro frecuencias de riego establecidas.

condiciones de salinidad o de estrés hídrico la actividad fotosintética decrece viéndose reducido el crecimiento de las plantas, el área foliar, la concentración de clorofila y la fluorescencia de la clorofila, situación que no se presentó en este experimento en cuanto a las concentraciones de clorofila y carotenoides, debido quizás a que las plantas no estuvieron sometidas a un prolongado estrés hídrico por parte de las frecuencias de riego establecidas.

Tabla 14.

Análisis de varianza de bloques al azar en arreglo factorial (4 x 4) y análisis de regresión para la concentración de carotenoides en $\mu\text{g/g}$ masa seca en plantas de Soya bajo cuatro frecuencias de riego y cuatro niveles de compactación de un suelo Ultisol.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados medios	FC	FT	Significancia
Bloques	3	6.53	2.18	7.72	2.86	*
Frecuencia de riego	3	1.29	0.43	1.53	2.86	ns
Compactación	3	1.02	0.34	1.21	2.86	ns
Frecuencia* Compac	9	2.81	0.31	1.11	2.14	ns
Error Experimental	45	12.67	0.28			
Variación Total	63	24.32	0.39			
Media General	0.73					
Coefficiente de Variación	72.70 %					

Tabla 15.

Análisis de varianza de bloques al azar en arreglo factorial (4 x 4) para la relación entre la concentración en $\mu\text{g/ml}$ de clorofila a y b en plantas de Soya bajo cuatro frecuencias de riego y cuatro niveles de compactación de un suelo Ultisol.

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrados medios	FC	FT	Significancia
Bloques	3	0.12	0.04	0.68	2.86	ns
Frecuencia de riego	3	0.04	0.01	0.24	2.86	ns
Compactación	3	0.04	0.01	0.23	2.86	ns
Frecuencia* Compac	9	0.51	0.06	1.00	2.14	ns
Error Exp.	45	2.58	0.06			
Variación Total	63	3.29	0.05			
Media General	0.38					
Coefficiente de Variación	63.00 %					

CONCLUSIONES

Tanto el contenido relativo de agua como el lavado de electrolito no se vieron afectados por ninguno de los factores establecidos.

Las concentraciones de clorofila *a*, *b* y carotenoides expresadas en mililitros y en gramos de masa fresca de solución mostraron una tendencia lineal a aumentar a medida que disminuye el porcentaje de humedad del suelo, mientras que para las concentraciones expresadas en gramos de masa seca no se obtuvieron diferencias significativas.

La concentración de clorofila (*a+b*) expresada en mililitros y en gramos de masa fresca de solución mostraron que el mejor comportamiento se obtuvo hacia los tratamientos de cero y doce número de golpes y frecuencia de riego de cada cuatro días, también se nota que la concentración tiende a aumentar al disminuir el porcentaje de humedad sin mucha variación con respecto al nivel de compactación.

Se evidenció que el factor frecuencia de riego fue el que resultó significativo para las variables evaluadas, permitiendo concluir que la humedad del suelo es un factor más influyente que la compactación sobre el desarrollo del cultivo de soya.

REFERENCIAS

- Barret, W. y Douglas, J. (2004). Electrolyte leakage from stem tissue as an indicator of hardwood seedling physiological status and hardiness. *Proceedings of the 14th Central Hardwoods Forest Conference* GTR-NE-316.
- Espinoza, J. (1970). *Estudio de las Series de Suelo y Levantamiento Agrológico del Campo Experimental Agrícola de la Sabana de Jusepin*. Universidad de Oriente. Escuela de Ingeniería Agronómica, Campus Los Guaritos, Maturín, Estado Monagas Venezuela: 42 p.
- Fehr, W., Caviness, C., Burmood, D and J. S. Pennington. (1991). Stage of development description for soybean (*Glycine max* (L) Merrill). *Crop Science* 11(6): 920-931 p.
- Gutiérrez, N., Venialgo, C., Gutiérrez, J., Drganc, D. y Oleszczuk, J. (2000). *Efecto del manejo de suelo sobre la densidad aparente y la resistencia mecánica a la penetración*. Conservación y Manejo de Suelos. Facultad de Ciencias Agrarias - UNNE. Revista Comunicaciones Científicas y Tecnológicas.
- Hossne, A. (2002). Valoración física conformante del ambiente radical. *Revista UDO Agrícola* 2 (1): 84-94. 2002.

- Jamil, M., Rehman, S., Lee, K., Kim, J., Kim, H. y Rha, E. (2007). Salinity reduced growth ps2 photochemistry and chlorophyll content in radish. *Sci. Agric.* 64(2): 111-118.
- Jaramillo, D. (2002). *Introducción a la ciencia del suelo*. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias-Medellín.
- Kramer, P. (1974). *Relaciones hídricas de suelos y plantas*. Edutex S.A. México. 538p.
- Lichtenthaler, H. y Wellburn A. (1983). Determination of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. *Biochemical Society Transactions* 1(11) 591 – 592.
- Lutts, K., Bouharmont, J. (1996). NaCl-induced senescence in leaves of rice (*Oryza sativa* L.) cultivars differing in salinity resistance. *Ann. Bot.* 1(78): 389–398.
- McNabb, K.; Takahashi, E. (2000). Freeze damage to loblolly pine seedlings as indicated by conductivity measurements and outplanting survival. Auburn University Southern Forest Nursery Management Cooperative. *Research Report* 00-4.
- Meléndez, L., Hernández, A. y Fernández, S. (2006). Efecto de la fertilización foliar y edáfica sobre el crecimiento de plantas de maíz sometidas a exceso de humedad en el suelo. *Bioagro* 18 (2):107-114.
- Pinheiro, C., Formaggio, A. y Schiavinato, M. (2004). Narrow band spectral indexes for chlorophyll determination in soybean canopies [*Glycine max* (L.) Merrill]. *Plant Physiology*. 16(3):131-136, 2004.
- Rodríguez, B. y Ramírez, R. (1986). Influencia de la tasa de difusión de oxígeno en el suelo sobre la acumulación de materia seca en maíz. *Revista Agronomía Tropical*. 37(4-6): 53-62.
- Solórzano, P., Muñoz, J. y Gamboa, M. (2005). *El cultivo de la soya en Venezuela*. Edición 2005. Publicación de Agrosileña. 188 p. Estado Aragua, Venezuela.