

INFLUENCIA DE LA SUCCION MAXIMA DEL AGUA Y DEL ESPACIO AEREO  
DEL SUELO SOBRE LA PRODUCCION DE LA VARIEDAD '27-R'  
DE FRIJOL (Phaseolus vulgaris L.)

Tesis de Grado  
de  
MAGISTER SCIENTIAE

LUCIO EDUARDO LEGARDA BURBANO



Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la O. E. A.  
Centro Tropical de Enseñanza e Investigación  
Departamento de Cultivos y Suelos Tropicales  
Turrialba, Costa Rica

Julio 1972

INFLUENCIA DE LA SUCCION MAXIMA DEL AGUA Y DEL ESPACIO AEREO  
DEL SUELO SOBRE LA PRODUCCION DE LA VARIEDAD '27-R'  
DE FRIJOL (Phaseolus vulgaris L.)

Tesis

Presentada al Consejo de la Escuela para Graduados  
como requisito parcial para optar al grado

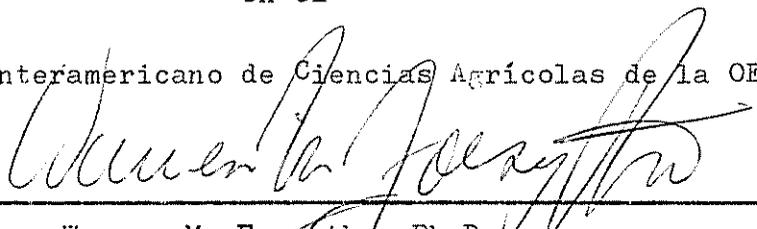
de

Magister Scientiae

en el

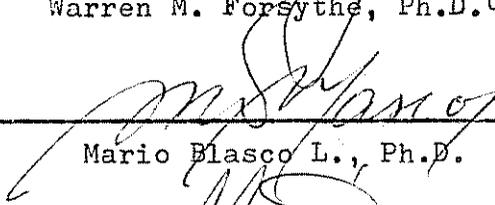
Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA

APROBADA:



Consejero

Warren M. Forsythe, Ph.D.



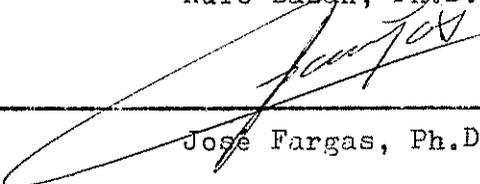
Comité

Mario Blasco L., Ph.D.



Comité

Rufo Bazán, Ph.D.



Comité

José Fargas, Ph.D.

Julio, 1972

Con todo cariño  
a mi madre y a  
mi esposa

## AGRADECIMIENTOS

El autor expresa su agradecimiento al Dr. Warren M. Forsythe, Consejero Principal, por su valiosa orientación y colaboración presta da en el desarrollo del presente trabajo de tesis.

Al Dr. Mario Blasco L. miembro del comité consejero por su amistad, constante estímulo y acertadas sugerencias.

A los Drs. Rufo Bazán y José Fargas miembros del comité consejero, así como también al Dr. Antonio Pinchinat.

Al Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA, por haberle otorgado la beca.

Y a todas aquellas personas que de una u otra forma contribuyeron a la realización de este trabajo.

## BIOGRAFIA

El autor nació en El Peñol, Nariño, Colombia el 7 de setiembre de 1943.

Realizó sus estudios secundarios en el Liceo de Bachillerato de la Universidad de Nariño, de la ciudad de Pasto.

Ingresó al Instituto Tecnológico Agrícola de la Universidad de Nariño, en 1964, recibiendo el título de Ingeniero Agrónomo en 1968.

En 1969 se vinculó a la Facultad de Ingeniería Agronómica de la Universidad del Tolima, Ibagué, como Profesor Auxiliar en Riegos.

En octubre de 1970 ingresó a la Escuela para Graduados del Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA en Turrialba, Costa Rica, realizando sus estudios en la especialidad de Suelos, graduándose de Magister Scientiae en julio de 1972.

## CONTENIDO

	<u>Página</u>
1. INTRODUCCION .....	1
2. REVISION DE LITERATURA .....	3
2.1. Aspectos generales .....	3
2.2. La succión del agua del suelo .....	4
2.3. Importancia de la succión total del agua del suelo .....	6
2.4. Influencia de la succión total en el crecimiento de las plantas .....	7
2.5. Formas para expresar la humedad del suelo .....	9
2.6. Aireación del suelo .....	9
2.7. Efecto de la aireación en el crecimiento de las plantas .....	10
2.8. Intercambio gaseoso .....	11
2.8.1. Difusión del aire en el suelo .....	12
2.9. Medida de la aireación del suelo .....	14
2.9.1. Rata de difusión de oxígeno (R.D.O.) ...	15
3. MATERIALES Y METODOS .....	17
3.1. Localización .....	17
3.2. Las macetas .....	17
3.3. El suelo .....	18
3.4. Variedad del frijol sembrada .....	19
3.5. Diseño experimental .....	19
3.6. Mediciones de las succiones máximas del agua del suelo durante el experimento .....	19
3.6.1. Medición de succiones entre 0,003 y 0,050 bares .....	19
3.6.2. Medición de succiones entre 0,10 y 0,80 bares .....	20
3.6.2. Medición de succiones entre 1,60 y 12,80 bares .....	21
3.7. Calibración de bloques de Nylón .....	21
3.8. Bases para las succiones entre 0,003 - 0,050 ba- res .....	22
3.9. Determinación del espacio aéreo para las succio- nes entre 0,003-0,050 bares .....	23

3.10.	Determinación de la rata de difusión de oxígeno (R.D.O.) .....	23
3.11.	Cálculo de la evaporación, del factor F y del factor R .....	24
3.12.	Manejo del experimento en el invernadero .....	25
3.13.	Rendimiento .....	27
3.14.	Materia seca .....	27
3.15.	Número de vainas y número de semillas por vaina .....	27
3.16.	Determinación del peso de la semilla .....	27
3.17.	Análisis estadístico .....	28
4.	RESULTADOS .....	30
4.1.	Rendimiento .....	30
4.2.	Materia seca .....	37
4.3.	Número de vainas .....	41
4.4.	Succión del agua del suelo .....	44
4.5.	Espacio aéreo .....	44
4.6.	Crecimiento de las plantas de frijol .....	50
4.7.	Penetrabilidad y resistencia al corte .....	54
4.8.	Evaporación, factor "f" y factor "R" .....	54
5.	DISCUSION .....	55
6.	CONCLUSIONES .....	62
7.	RESUMEN .....	63
7a.	SUMMARY .....	64
8.	LITERATURA CITADA .....	65
	APENDICE .....	73

## LISTA DE FIGURAS

Figura Nº		<u>Página</u>
1	Relación entre las propiedades y el factor de crecimiento, la succión total .....	7
2	Relación entre el rendimiento y la succión a 5 cm y 15 cm de profundidad .....	31
3	Relación entre el rendimiento y la succión a 5 cm de profundidad para los tratamientos 0,003 - 0,050 bares .....	32
4	Función gamma entre el rendimiento y la succión a 5 y 15 cm de profundidad para los tratamientos 0,10 - 12,80 bares .....	34
5	Relación entre el rendimiento y la succión a 5 cm de profundidad para todos los tratamientos 0,003 - 12,80 bares. Porcentajes de pérdida del rendimiento máximo estimado .....	35
6	Relación entre el rendimiento y la rata de difusión de oxígeno .....	36
7	Relación entre la materia seca y la succión a 5 y 15 cm de profundidad para los tratamientos 0,10 - 12,80 bares .....	38
8	Relación entre la materia seca y la succión a 5 cm de profundidad para los tratamientos 0,003 - 0,050 bares .....	39
9	Relación entre la materia seca y succión a 5 y 15 cm de profundidad para los tratamientos 0,10 - 12,80 bares .....	40
10	Relación entre la materia seca y la succión a 5 cm de profundidad para todos los tratamientos 0,003 - 12,80 bares. Porcentaje de pérdida de la materia seca máxima estimada con relación al aumento de la succión .....	42
11	Relación entre la materia seca y la rata de difusión de oxígeno .....	43
12	Relación entre la succión a 5 cm y la succión a 15 cm de profundidad en función del tiempo en semanas .....	45

<u>Figura Nº</u>		<u>Página</u>
13	Relación entre la succión y la rata de difusión de oxígeno del electrodo de platino a 5 y 15 cm de profundidad .....	46
14	Relación entre el espacio aéreo y la succión a 5 cm de profundidad .....	47
15	Relación entre el rendimiento y el espacio aéreo para los tratamientos con succión 0,003 - 0,050 bares .....	48
16	Relación entre la materia seca y el espacio aéreo para los tratamientos con succión 0,003 - 0,050 bares .....	49
17	Relación entre la rata de difusión de oxígeno y el espacio aéreo a 5 y 15 cm de profundidad ...	51
18	Crecimiento del frijol para las succiones extremas 0,003 y 12,80 bares y tratamiento de óptima producción 0,80 bares .....	52
19	Relación entre la rata de difusión de oxígeno y el tiempo en semanas. Las lecturas de R.D.O. se iniciaron cuando el cultivo de frijol tenía tres semanas de edad .....	53

## 1. INTRODUCCION

El crecimiento constante de la población en el Trópico Americano trae consigo la necesidad del aumento en la producción de cultivos alimenticios básicos. Entre estos ocupa papel fundamental el cultivo del frijol, considerado como la fuente principal de proteína vegetal más barata (?).

Son varios los factores ecológicos que inciden sobre el rendimiento del frijol. Uno de ellos es el agua que actúa como elemento limitante en muchas zonas tropicales tanto por su escasez como por su exceso. Midiendo la succión del agua en el suelo que permita el crecimiento óptimo de las variedades de frijol de importancia económica, bajo condiciones controladas de invernadero se determina un dato valioso con respecto al manejo del agua para este cultivo, ya que a nivel tropical es poca la información que existe sobre su respuesta a diferentes condiciones de succión. La importancia de este parámetro está en que se puede aplicar a suelos de diversas zonas frijoleras. Como complemento es útil determinar el régimen de espacio aéreo bajo los diferentes tratamientos de succión del agua en el suelo, puesto que en varios estudios se ha considerado tanto la succión como la aireación en forma independiente. Una de las maneras de abordar este problema es midiendo los requisitos del frijol en cuanto al nivel de humedecimiento y al grado de aireación del suelo para lograr una producción adecuada. El presente trabajo es un aporte a este tipo de estudios.

Los objetivos de esta investigación fueron:

- a) Determinar el efecto de diferentes condiciones de succión máxima cíclica del suelo sobre la producción y crecimiento del frijol.
- b) Determinar los valores de espacio aéreo del suelo que limitan la producción y el crecimiento del frijol.

## 2. REVISION DE LITERATURA

### 2.1. Aspectos generales

El aumento reciente del uso del riego en latinoamérica, para elevar el rendimiento del frijol, reclama un mejor entendimiento de las relaciones suelo-agua-planta. Para establecer el momento oportuno de riego, es necesario determinar cuales son los valores hasta los cuales debe descender el contenido de humedad, obteniendo rendimientos óptimos con el mínimo de agua del riego. Sin embargo estos valores varían según la textura del suelo, su mineralogía, su contenido de materia orgánica, el contenido de sales, etc.; por lo tanto es necesario referirlos a la succión total del agua del suelo y expresarlos en función de las fuerzas de tensión que retienen el agua. Al respecto varios investigadores (60, 47, 86, 87) han encontrado alta correlación entre los rendimientos y la succión.

El concepto referente a si el agua del suelo es igualmente disponible entre la capacidad de campo y el punto de marchitez o si disminuye antes de llegar a este punto, ha sido ampliamente estudiado por varios investigadores (29, 32, 84, 59, 62, 68, 71) principalmente en la zona templada. Indican que el crecimiento de las plantas disminuye a medida que la humedad del suelo se reduce desde la capacidad de campo hasta el punto de marchitez permanente. Anotan además que este último concepto no está determinado únicamente por las características del suelo, sino principalmente por las características fisiológicas de las plantas. Su importancia radica en el conocimiento del

grado hasta el cual puede descender la humedad del suelo sin que produzca una reducción notable en el rendimiento de las cosechas.

Según Vaadia y colaboradores (80) las cosechas responden tanto a las clases de suelo como a las condiciones climáticas y a la especie bajo estudio, según esto los conceptos de capacidad de campo y punto de marchitez no pueden ser aplicados en forma general.

## 2.2. La succión del agua del suelo

En la literatura técnica se encuentra una variedad de términos que expresan la aprovechabilidad del agua del suelo por las plantas y las fuerzas que la afectan.

Wadleigh (86), Wadleigh y Ayres (87), con el fin de proporcionar una base dinámica para comprender los efectos osmóticos sobre el crecimiento de las plantas propusieron el concepto de tensión total de la humedad del suelo que se expresa de la siguiente manera:

$$S = T + N \quad [1]$$

Donde:

S = Tensión total de la humedad del suelo en atmósferas

T = Tensión de la humedad del suelo en atmósferas

N = Presión osmótica de la solución del suelo en atmósferas.

$T = f(P_{\theta})$ ,      y       $N = f(P_{\theta})$

$P_{\theta}$  = Porcentaje de humedad del suelo

El término tensión total de la humedad del suelo puede considerarse como equivalente al esfuerzo total de la humedad del suelo

(28, 78), al potencial total de Bolt y Miller o a la actividad de Taylor y a la energía libre parcial de Bolt y Friessel (26).

Richards y colaboradores (61, 62), Taylor (76), y Marshall (49), propusieron una terminología para sustituir a la anterior: succión matriz y succión soluto, que luego se denominaron succión matricial y succión osmótica (70). La succión matricial es originada por la fase sólida del suelo, y la segunda por las sustancias solubles en el agua del suelo, es decir por la solución del suelo y se manifiesta porque las raíces tienen membranas semi-permeables. Cuando se usa simplemente la palabra succión se refiere a la succión matriz. La succión de la solución es causada por la presión de electrolitos libres que se encuentran en el suelo y la succión matriz es causada por la atracción agua-suelo.

La succión total del suelo es igual a la suma de las succiones matriciales y del agua en el suelo y además de la succión osmótica (70). También se definió la succión del agua del suelo como la presión negativa que registra un manómetro en comparación con la presión externa del gas, que tiene que aplicarse a una solución de composición idéntica a la del agua del suelo, para que la solución esté en equilibrio de flujo con el agua del suelo, por medio de su contacto mutuo a través de una pared permeable que permita solamente el flujo del agua del suelo (18).

Recientemente se ha adoptado como unidad de trabajo para efectos de succión, el bar, que es una unidad similar a la atmósfera (1 bar = 0,987 atm, 1 atmósfera = 1,013 bar) y el milibar ( $10^3$  dina/cm<sup>2</sup>) se aproxima también a la presión de 1 cm de agua, (1 milibar = h/1,022).

Según algunos autores (26, 49, 62), estas unidades de medida de la succión son de utilidad para expresar en forma consistente altas o bajas retenciones de agua por el suelo.

### 2.3. Importancia de la succión total del agua del suelo

Forsythe (18), llama la atención sobre la importancia de la succión total en el crecimiento de las plantas y por lo tanto sobre el efecto y manejo de ella, anotando que es esta la que afecta las raíces de las plantas.

La succión total del agua del suelo influye en la absorción del agua por la planta y lógicamente en el aprovechamiento de nutrimentos en la solución (60). Así mismo modifica los procesos biológicos del suelo, de los que depende en alto grado la asimilación de nutrimentos por la planta. Entre éstos uno de los más importantes es la nitrificación (35, 60).

La succión es el concepto básico para describir el agua del suelo, así como también la humedad del mismo. Los suelos a distintas profundidades suministran la misma succión, sin embargo el resultado puede ser el mismo a pesar de tener diferentes valores de humedad (20).

La succión del agua del suelo es una manifestación de la atracción agua-suelo, en la cual la presión del agua es menor que la presión del aire en contacto con esa agua. Un aumento en la humedad del suelo disminuye el valor de la succión, hasta alcanzar la humedad correspondiente al nivel de agua libre cuando la presión del agua del suelo es atmosférica, en este caso la succión es nula y es positiva

cuando bajo el nivel freático la presión del agua del suelo es mayor que la presión atmosférica (51, 61).

La Figura 1 muestra como varias propiedades físicas y físico-químicas del suelo y del clima influyen en la succión total del agua del suelo (20).

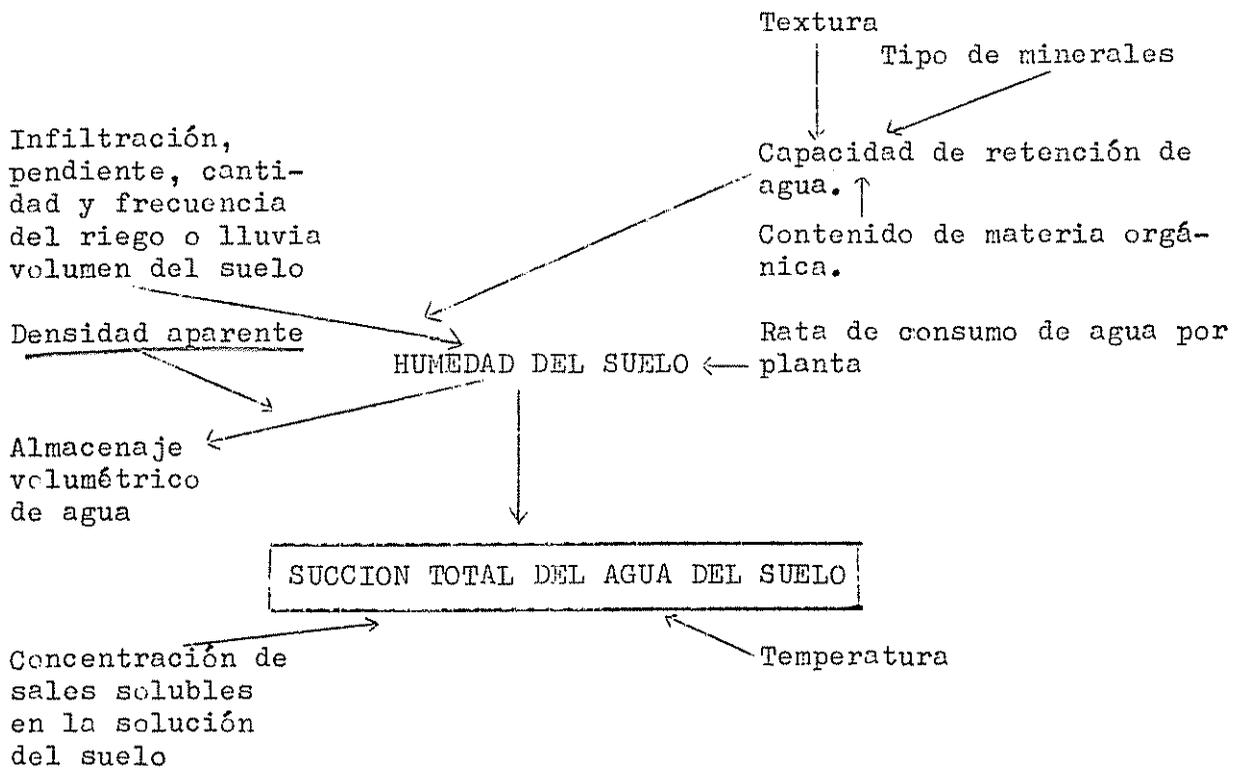


Fig. 1. Relación entre las propiedades físicas y el factor de crecimiento: la succión total.

#### 2.4. Influencia de la succión total en el crecimiento de las plantas

La experiencia demuestra que el desarrollo y el crecimiento del sistema radical es controlado por la tensión del agua del suelo. El crecimiento disminuye con el aumento de la tensión del agua, pero el desarrollo de las raíces está menos influenciado que el desarrollo de

la planta (57). Así mismo la elongación y el crecimiento del tallo están influenciados por la succión del agua del suelo.

Las plantas extraen el agua del suelo contra la succión total con diferentes grados de facilidad, es decir que las plantas tienen su propia capacidad para extraer agua del suelo, e igualmente el suelo tiene su propia capacidad para proporcionar agua a varios niveles de succión (20).

El agua es esencial para el crecimiento y correcto desarrollo de las plantas desde la germinación hasta la cosecha. Los pasos iniciales de la germinación como la división celular, la elongación celular no son muy afectados por la succión del agua en si mismo, pero el tiempo requerido para la completa germinación es bastante largo por el incremento de la succión del agua. El retraso de la germinación bajo condiciones de alta succión del agua del suelo, probablemente es debido a la rata limitada de conducción de agua para el embrión. La presión de agua, y la succión total afectan fuertemente el porcentaje y la rata de emersión de las plantas. La germinación es fuertemente limitada por la naturaleza de las fuerzas de retención de agua por las partículas del suelo (57, 84, 14).

Según Peters y Runkles (57), en general, la succión del agua puede afectar el sistema radical en tres formas: a) en la dirección del crecimiento de las raíces; b) en la extensión lateral, en la ramificación y en la profundidad de penetración y c) en el crecimiento relativo del sistema radical con respecto a la parte aérea.

## 2.5. Fornas para expresar la humedad del suelo

Existen dos conceptos fundamentales en cuanto a la forma de expresar la humedad del suelo, que son: cantidad de agua en el suelo en un momento dado y la fuerza o tensión con que el agua está retenida por el suelo (36). Estos dos conceptos pueden ser relacionados a través de curvas de retención de humedad que consideran precisamente cantidad de agua y la fuerza con que está retenida el agua en el suelo.

La humedad en el suelo en un momento dado puede ser medida por diversos métodos tales como: métodos gravimétricos o volumétricos, dispersión de neutrones, rayos gamma y otros (36). La fuerza con que está retenida el agua por el suelo puede medirse mediante tensiómetros hidrostáticos, tensiómetros de reloj, bloques calibrados de resistencia eléctrica, depresión del punto de congelación, aparatos con platos o membranas de presión (25, 30).

## 2.6. Aireación del suelo

Según Buckingham (8), Penman (55), Taylor (74), Van Bavel (81), Marshall (48), Millington (52), Letey (43), la aireación es el proceso por el cual se intercambian los gases consumidos o producidos bajo la superficie del suelo con gases de la atmósfera externa.

La aireación del suelo disminuye al reducirse el espacio aéreo total el cual a su vez está asociado con un aumento de la humedad del suelo o una disminución de la fuerza de succión del agua. Varios investigadores (2, 37, 64, 67, 75, 88) han estudiado tanto la succión como la aireación en forma independiente. Sin embargo Forsythe (19)

anota que es conveniente considerarlas conjuntamente.

La mayoría de las reacciones biológicas que ocurren en el suelo consumen oxígeno y producen  $\text{CO}_2$ . Este proceso general conocido como respiración aeróbica hace que la aireación del suelo sea un problema importante, cuando se considera el crecimiento de las plantas (74).

## 2.7. Efecto de la aireación en el crecimiento de las plantas

La mayoría de las plantas superiores necesitan una apropiada aireación del suelo para el desarrollo normal del sistema radical, a fin de que se facilite una máxima absorción de sustancias nutritivas y de agua (27, 89). Cuando en el suelo hay una mala aireación, el crecimiento de la planta se afecta notablemente y el sistema radical se reduce, bien sea por la carencia de oxígeno o por la acumulación de dióxido de carbono en los alrededores de las raíces (16, 66, 91). El contenido de oxígeno decrece y el de  $\text{CO}_2$  aumenta en el suelo, conforme aumenta la profundidad, aumenta la temperatura y disminuye el espacio poroso (22).

El espacio aéreo total del suelo, si es bajo, limita el crecimiento de las plantas, pero la proporción de abastecimiento de oxígeno y extracción de  $\text{CO}_2$  pueden ser factores más críticos que la cantidad de aire presente en el suelo (38).

Taylor (74), señala que, el efecto de la aireación del suelo en el crecimiento de las plantas superiores, puede considerarse de acuerdo a estos dos grupos: a) Efecto sobre los constituyentes del suelo, los cuales a su vez influyen en el crecimiento; y b) efecto directo en las condiciones fisiológicas de las plantas.

En cuanto a los nutrimentos una deficiente aireación dificulta su asimilación por las plantas (10). Chang y Loomis (9) mostraron que la disminución de la absorción de nutrimentos por las raíces de las plantas en presencia de dióxido de carbono tiene la siguiente secuencia:  $K > N > P > Ca > Mg$ .

Pepkowitz y Shive (56), estudiando las plantas de tomate y frijol encontraron que la absorción de ciertos nutrimentos estaba relacionada directamente con la presencia de oxígeno disuelto en la solución de los cultivos. Para frijol, la absorción de potasio, calcio y fósforo fue mínima a 0 ppm de oxígeno; en cambio la absorción fue máxima a 16 ppm de oxígeno.

Vomocil y Flocker (85) concluyeron que el rango general 10-15 por ciento, del porcentaje del espacio aéreo es el adecuado para un gran número de cultivos. La caña de azúcar necesita un mínimo de 11 por ciento para una buena cosecha (65).

La cantidad de dióxido de carbono libre en el suelo depende de la descomposición de sustancias orgánicas que son modificadas por las propiedades físicas del suelo, tales como la humedad, la porosidad y el calor. Se atribuye la variación del contenido de  $CO_2$  en el aire del suelo a la actividad de los microorganismos y las raíces, por consiguiente una deficiente aireación desempeña un papel importante en esta actividad (38).

## 2.8. Intercambio gaseoso

Según Lemon y Erickson (40), Wiegand y Lemon (89), en el suelo se producen dos procesos importantes que son: a) la producción de  $CO_2$

y el consumo de oxígeno; b) la relación de intercambio entre el suelo y la atmósfera externa.

Según estos mismos autores es posible que actúan dos mecanismos diferentes en el intercambio de gases entre el suelo y la atmósfera que son: el flujo masivo y la difusión. El flujo masivo o corriente de la masa de aire consiste en el movimiento de gases en respuesta a la gradiente de la presión total entre la atmósfera y el aire del suelo. Este movimiento sucede como consecuencia de la temperatura, en el volumen total o en los poros disponibles, para el aire. Ocurre el flujo masivo cuando el suelo se irriga y el agua obliga al aire hacia el exterior.

#### 2.8.1. Difusión del aire en el suelo

La difusión es el proceso más importante en la aireación del suelo y depende únicamente de las diferencias de presión parcial de los gases que intervienen a través de este proceso; cada gas tiende a moverse en una dirección determinada por su propia presión parcial, como consecuencia del consumo de oxígeno y la producción de dióxido de carbono (44, 74). La rapidez con que se produzca este proceso depende de la proporción del volumen del suelo ocupado por los gases y de que estos espacios de aire formen canales continuos entre la superficie y el interior. Taylor (74), ha demostrado que la difusión de oxígeno está rigurosamente controlada por el grado de compactación y por el contenido de humedad del suelo y que los efectos de estas variaciones pueden expresarse en función de su influencia sobre espacio aéreo total.

El coeficiente de difusión es un parámetro empleado para caracterizar la difusión (54, 58). Hannan citado por Blake y Page (6), fue probablemente uno de los primeros que estudió la difusión como tal en el suelo, usando columnas de suelo, alrededor de 25 cm de largo; debajo de la columna colocó una cámara de CO<sub>2</sub>; después de permitir la difusión en un período de 10 horas, analizó el gas que quedó en la cámara, concluyendo que la cantidad de gas difundido varía directamente con el espacio aéreo, es decir:

$$Q = K \cdot E_a \quad [2]$$

donde:

Q = cantidad de gas difundido a través del suelo

K = constante

E<sub>a</sub> = espacio aéreo

Buckingham (8) en otro experimento concluyó que la constante de difusión varía como el cuadrado del espacio aéreo, o sea:

$$Q = K \cdot E_a^2 \quad [3]$$

Penman (55), como resultado de sus experimentos, encontró que la relación entre la difusión del suelo y el espacio aéreo es:

$$\frac{D}{D_o} = 0,66 E_a \quad [4]$$

donde:

D = coeficiente de difusión de un gas a través de la masa del suelo

D<sub>o</sub> = coeficiente de difusión de un gas a través del aire libre

Van Bavel (81), estableció la siguiente relación:

$$\frac{D}{D_o} = 0,6 E_a \quad [5]$$

Millington (52), encontró la siguiente razón:

$$\frac{D}{D_o} = E_a^{3/4} \quad [6]$$

Marshall (48), también encontró la siguiente relación:

$$\frac{D}{D_o} = E_a^{3/2} \quad [7]$$

El coeficiente de difusión de oxígeno en agua a 25 °C es  $2,6 \times 10^{-5}$  cm<sup>2</sup>/seg (41) y en el aire  $2,26 \times 10^{-1}$  cm<sup>2</sup>/seg (90). Estas magnitudes relativas de los coeficientes predicen que la transferencia difusiva del O<sub>2</sub> y el CO<sub>2</sub> será aproximadamente 10.000 veces mayor en el aire que en el agua con iguales gradientes y áreas de difusión (90). Esto explica porque el agua puede formar una barrera efectiva contra una rápida difusión.

## 2.9. Medida de la aireación del suelo

Se han usado varios métodos para caracterizar el estado de aireación del suelo. Letey (43) describe 6 métodos para determinar la aireación a saber: a) porosidad de aireación; b) permeabilidad del aire; c) composición del gas en los poros abiertos; e) difusión en la fase gaseosa; f) difusión a través del medio sólido-líquido-gaseoso que rodea un electrodo de platino cilíndrico y mide la rata de difusión

de oxígeno, llamado comúnmente técnica del microelectrodo de platino, introducido por Lemon y Erickson (40, 42).

El método a usarse depende del objetivo que se propone para hacer la medición. Sin embargo parece ser que el método que mide la rata de difusión de oxígeno es el más recomendable por cuanto ha sido usado por muchos investigadores, ya que ofrece una solución racional al problema de determinar la capacidad de suministro de oxígeno de un suelo midiendo la rata de difusión a través de la interfase líquido-aire que rodea la raíz.

#### 2.9.1. Rata de difusión de oxígeno (R.D.O.)

Lemon y Erickson (40, 42), usaron el término rata de difusión de oxígeno para expresar el flujo de oxígeno requerido por las plantas como un índice de la aireación, que se mide en el suelo. El principio del medidor de la rata de difusión de oxígeno se basa en la aplicación de cierto potencial eléctrico negativo en el electrodo de platino que está en el suelo en comparación con un electrodo de referencia, lo que provoca una reducción de oxígeno en la superficie del platino (5, 40, 45).

La rata de difusión de oxígeno es una ecuación lineal, por lo que incluye tanto el coeficiente de difusión como la gradiente de concentración en la superficie del electrodo (5, 72). La rata de difusión de oxígeno está ligada a la aireación del suelo, que mediante condiciones óptimas favorece el desarrollo de las cosechas (44, 46).

Se ha demostrado que bajo condiciones de suelo con alto contenido de agua, hay una mayor distancia entre la raíz y la fase gaseosa o

una partícula de agua de mayor espesor alrededor de la raíz, además hay bajo volumen de la fase gaseosa, lo cual puede reducir la rapidez de intercambio de gases, dando por consiguiente valores inferiores en la medida de la rata de difusión de oxígeno. Al aumentar los procesos respiratorios se consume el oxígeno de los poros disminuyendo su concentración, si esto sucede las plantas sufren daño, debido a la falta adecuada de suministro de oxígeno. A medida que disminuye la humedad del suelo, decrece el espesor de la película de agua, alrededor de la raíz y puede haber un alto volumen de gas intercambiable, lo cual sería favorable para una alta difusión de gases (24).

Según Stolzy y Letey (72, 73), la R.D.O. de oxígeno crítica para la mayoría de los cultivos parece ser inferior a  $20 \times 10^{-8} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$  y varía según las plantas y el tipo de suelo. La R.D.O. puede considerarse como un factor de crecimiento (20).

La rata de difusión de oxígeno a través del líquido, en los alrededores de las raíces depende del coeficiente de difusión del agua, de la fracción de área que no está ocupada por los sólidos, por la trayectoria tortuosa de difusión y la gradiente de concentración la cual depende del espesor de la lámina de agua alrededor de las raíces y de la rata de uso.

### 3. MATERIALES Y METODOS

#### 3.1. Localización

El experimento se realizó en un invernadero adyacente al laboratorio de suelos del Centro Tropical de Enseñanza e Investigación del Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas, en Turrialba, Costa Rica. Las coordenadas del CTEI son: latitud norte 9° 55', latitud este 83° 58' y según Holdridge (33) pertenece al bosque subtropical muy húmedo, con una altura de 630 m sobre el nivel del mar, precipitación promedio anuales de 2.682 mm y con temperaturas medias mensuales de 22,3 °C temperaturas máximas de 23,2°C y mínimas de 16,9°C (34).

En el invernadero la temperatura media durante el experimento fue 24,6°C, la máxima de 30,5°C y la mínima de 18,8°C. La humedad relativa media fue 74,5 por ciento, la máxima 95,5 y la mínima 47,2 por ciento.

#### 3.2. Las macetas

Las macetas que se usaron en el experimento fueron de lata de forma rectangular y fondo plano con capacidad aproximada de 26 litros, altura 30,0 cm, ancho interno 20,0 cm y 50,0 cm de largo. Todas se recubrieron con pintura asfáltica para impedir la oxidación y para mejor presentación y se distribuyeron al azar sobre tres mesas para tal fin, cuyas dimensiones son 3,0 m de largo por 1,10 m de ancho y a 1,0 m de la superficie del suelo.

### 3.3. El suelo

Para el experimento en el invernadero se escogió el suelo de la serie la "Margot" fase normal considerado por Hardy (31), como uno de los más productivos dentro del área del CTEI-IICA. Según Dondoly y Torres (15) este suelo se ha desarrollado sobre materiales aluviales o fluvio lacustres. De acuerdo a Aguirre (1) los suelos de esta serie pertenecen al orden Inceptisol, sub-orden Tropepts, gran grupo Dystropepts, sub-grupo Typic Dystropepts, familia Fine, mixed, Isohyperthermic (79).

El muestreo se hizo en varios lugares, cercanos entre si. El suelo se secó al aire, se tamizó en mallas de 5 mm y se homogeneizó. Posteriormente se llevó el suelo a una pila donde se fumigó con Dow Fume MC 2 (Bromuro de metilo) por 24 horas para evitar la presencia de organismos dañinos en el suelo.

Según el análisis físico-químico este suelo presenta las siguientes características: densidad aparente de 1,00 g/ml, densidad de sólidos de 2,49 g/ml, contenido de arcillas 32%, de limo 40% y de arena 28%, según esto la clasificación textural corresponde a Franco-Arcilloso, pH en agua (1:1) 5,4, contenido de materia orgánica 6,0%, de carbono orgánico 3,48%, de nitrógeno total 0,36%, relación C/N de 9,7, fósforo disponible según Bray-Kurtz I 1,6 ppm, capacidad de intercambio de cationes 39,8 me/100 g, calcio 8,0 me/100 g, potasio 0,6 me/100 g, magnesio 2,5 me/100 g. Conductividad eléctrica 0,4 mmho/cm.

### 3.4. Variedad de frijol sembrada

Se usó la variedad de frijol (Phaseolus vulgaris L.) denominada 27 R, arbustiva con una altura aproximada de 60 a 70 cm y con granos de color rosado.

### 3.5. Diseño experimental

El diseño experimental empleado fue el de bloques al azar, con 13 tratamientos y 4 repeticiones. Las plantas de frijol que se emplearon en el experimento fueron 104, correspondiendo 8 plantas por tratamiento y 2 por cada maceta.

El experimento consistió en 13 niveles diferentes de succión máxima a saber: 0,003; 0,006; 0,0125; 0,025; 0,050; 0,10; 0,20; 0,40; 0,80; 1,60; 3,20; 6,40; 12,80 bares.

### 3.6. Mediciones de las succiones máximas del agua del suelo durante el experimento

Las succiones máximas de los 13 tratamientos se midieron de la siguiente manera:

#### 3.6.1. Medición de succiones entre 0,003 y 0,050 bares

Para medir las succiones máximas de los tratamientos 0,003; 0,006; 0,0125; 0,025; y 0,050 bares se fabricaron tensiómetros de manómetro de agua. Los tensiómetros consistían en tubos plásticos de polietileno de unos 3 mm de diámetro externo y de 2 mm de diámetro interno, con una longitud de 2,20 m. A unos 40 cm de uno de los

extremos del tubo del drenaje se construyó la caja de filtro de asbesto (Figura 20). Estos tensiómetros dejan pasar el agua y no el aire hasta una presión de entrada de 0,35 bares (21, 83). Los tensiómetros se colocaron a una profundidad de 5 cm y 15 cm de la superficie del suelo.

Los tensiómetros hidrostáticos funcionaron cuando el suelo estaba bajo una condición de succión de humedad limitante ejerciendo una fuerza de atracción sobre el agua del suelo que está en contacto con el material poroso del tensiómetro, transmitiéndola al seno de la masa líquida almacenada en el tubo de drenar. Se determinó la succión del agua del suelo al punto del filtro poroso por la diferencia en los niveles entre el filtro que está en contacto con el suelo y el menisco de agua, como se observa en la Figura 21. Cuando hay equilibrio entre el tensiómetro y la humedad del suelo que rodea el filtro poroso, la lectura del aparato indica la succión del agua del suelo.

### 3.6.2. Medición de succiones entre 0,10 y 0,80 bares

Para los tratamientos cuyas succiones máximas respectivamente son: 0,10; 0,20; 0,40 y 0,80 bares se utilizó tensiómetros con medidor de vacío de reloj Tipo Nº 2700 B, "Soilmoisture Equipment" (69). El tensiómetro registró las fluctuaciones de succión entre 0,10 y 0,80 bares. En caso de que esta sea mayor de 0,80 bares las mediciones pierden presión (3, 51, 63). Los tensiómetros se colocaron a 5 cm y 15 cm de profundidad (Figura 22).

### 3.6.3. Medición de succiones entre 1,60 y 12,80 bares

Para los tratamientos cuyas succiones máximas son: 1,60; 3,20; 6,40; y 12,80 bares respectivamente se empleó un aparato llamado "Medidor de humedad del suelo" modelo MC 300A (Soiltest Inc) que determina la succión por medio de la resistencia eléctrica (12).

El equipo necesario está constituido por dos electrodos incrustados en un bloque de nylon que consiste en dos láminas de material metálico inoxidable, entre los cuales se encuentra atrapada una red de alambres plásticos muy finos. Este bloque se coloca en contacto con el suelo y los cables procedentes de los electrodos que se conectan a un ohmiometro que registra la resistencia al paso del flujo eléctrico procedente del bloque de nylon (11). Los bloques de nylon se colocaron a 5 cm y 15 cm de profundidad.

### 3.7. Calibración de bloques de nylon

En vista de que la conductividad eléctrica es diferente en el suelo fue necesario calibrar la resistencia para cada bloque a varias tensiones con el fin de determinar mayor precisión en la medición de la succión de la humedad del suelo. La calibración se hizo utilizando la olla y membrana de presión, prueba de Laboratorio que consiste en la aplicación de aire a presión sobre una lámina de suelo alterado de la serie "La Margot", fase normal de 2 cm de espesor por uno 16 cm de diámetro. Esta lámina se colocó sobre platos de cerámica y en ella se insertaron los bloques de nylon y luego se llevó a la olla de presión. Al cabo de 72 horas la humedad de la lámina del

suelo estaba en equilibrio con la humedad de los bloques de nylon y se hicieron lecturas para cada bloque y succión.

### 3.8. Bases para las succiones entre 0,003 - 0,050 bares

Para alimentar de agua a los tratamientos de succiones de 0,003; 0,006; 0,0125; 0,025 y 0,050 bares y para que el agua entre uniformemente al suelo se construyeron unas bases, cuyas dimensiones son: 45 cm de largo por 20 cm de ancho por 0,60 cm de espesor.

Las bases constan de un pedazo de fórmica de 45 cm de largo por 20 cm de ancho que sirven de soporte y sobre este al lado y lado se adhirió con un pegante, dos bandas del mismo material cuyas dimensiones son: 45 cm de largo por 9,5 cm de ancho. De esta manera se formó un canal en el centro del soporte por el cual corrió el agua, y se empató con tubos plásticos de 100 cm por un extremo y de 20 cm por el otro extremo. Sobre todo esto se colocó una lámina de asbesto de 45 cm de largo por 20 cm de ancho y se selló herméticamente por los costados con "Epoxy" para evitar la entrada de aire. Para una mayor duración y para evitar que entren partículas de suelo se recubrió con tela de nylon (Figura 22). El agua se suministró a las bases y desde luego al suelo por medio de un vaso plástico graduado y un tubo de polietileno que por un extremo se introducía en el agua y por el otro estaba adherido a la base. De esta manera se pudo manejar el experimento a baja succión. En los tratamientos 0,003 - 0,050 bares la succión se mantuvo constante, pero con una fluctuación aproximadamente de 5 cm.

3.9. Determinación del espacio aéreo para las succiones entre 0,003 - 0,050 bares

Para la determinación del espacio aéreo en los tratamientos con succiones de 0,003; 0,006; 0,0125; 0,025 y 0,050 bares se hizo la siguiente prueba: se llenaron cuatro macetas de suelo tamizado a 5 mm y se introdujo en ellas tensiómetros hidrostáticos a 5 cm y 15 cm de profundidad de la superficie del suelo. Luego se inundaron y se pesaron, cuando se alcanzó una succión de 0,003 bares también se pesó, y así sucesivamente hasta alcanzar una succión de 0,050 bares. En el Cuadro 32 se describe el procedimiento para el cálculo del espacio aéreo.

3.10. Determinación de la rata de difusión de oxígeno (R. D. O.)

Para medir la rata de difusión de oxígeno se usaron microelectrodos de platino del tipo TW E 14656 K 600 V, (Dicks Machine Shop, Lansing, Michigan).

El equipo necesario está constituido por: microelectrodos, un juego de líneas para los microelectrodos, caja de control, batería de 3 voltios y de una celda de referencia de cloruro de plata.

Se insertaron los microelectrodos en todas las macetas a dos profundidades a partir de la superficie del suelo a 5 cm y 15 cm. Se hicieron determinaciones cada tres días, antes de hacer las lecturas se colocaron alambres metálicos comunes de 30 cm de longitud con un extremo terminado en punta y pintados de color negro. Estos alambres se extraían en el momento de hacer las determinaciones, dejando un hueco que permitía insertar y extraer fácilmente el

microelectrodo sin dañarlo.

Para hacer los cálculos se aplicó la fórmula descrita por Letey y Stolzy (45):

$$R.D.O. = \frac{i \times 10^{-6} \times 60 \times 32 \times 10^8}{4 \times 96.500 \times A} \quad [8]$$

Donde:

$$R.D.O. = \text{rata de difusión de oxígeno en g de oxígeno por } X \times 10^{-8} \\ \text{cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$$

i = corriente eléctrica en microamperios

A = área del electrodo de platino en  $\text{cm}^2$

### 3.11. Cálculo de la evaporación, del factor F y del factor R

Se determinó la evaporación del invernadero por medio de las fórmulas de García - López (23), Papadakis (53), y Van Bavel - Penman (82). Se eligieron estas tres fórmulas para el cálculo de la evaporación por cuanto se ha demostrado por medio de estudios de comparación (39), que son las más recomendables. La fórmula de Papadakis y Van Bavel - Penman se las ajustó por medio de un factor regional de 0,82 y 0,56 encontrado por Legarda y Forsythe (39).

Se estudió el factor f que es igual a la relación entre la evapotranspiración potencial y la evaporación ( $f = ETP/EV$ ) y el factor R que es igual a la razón entre la evapotranspiración y la evapotranspiración potencial ( $R = ET/ETP$ ).

### 3.12. Manejo del experimento en el invernadero

El suelo secado al aire se depositó sobre las macetas dejando un espacio de 5 cm entre la superficie del suelo y los bordes de la misma y en ellas se colocaron los diferentes aparatos de medición de las respectivas succiones, a 5 cm y 15 cm de profundidad de la superficie del suelo y en la parte central de la maceta donde se encuentra la mayor actividad radicular.

Para las lecturas en los tensiómetros de manómetro de agua, tensiómetros con medidor de vacío de reloj y medida de humedad con los bloques de nylon se tuvieron en cuenta como referencia los colocados a 5 cm de profundidad, considerando que a esta profundidad es mayor la concentración de raíces y la actividad de las mismas.

El suelo se fertilizó teniendo en cuenta el número de plantas de frijol por hectárea con base a una distancia de 10 cm entre planta y 50 cm entre surco. Según estas distancias el número de plantas por hectárea es de 200.000. Los niveles de fertilizante que se aplicaron se extractaron del trabajo realizado por Martini (50). Los diferentes nutrimentos fueron aplicados en solución al suelo. El calcio y magnesio fueron adicionados cinco días después de los demás nutrimentos para reducir la posible formación de precipitados, especialmente con los fosfatos. (Cuadro 1)

La siembra se efectuó unos días después de la aplicación del calcio y magnesio permitiendo así un período de equilibrio entre el fertilizante y el suelo.

Las plantas de frijol se pusieron a germinar sobre unos recipientes rectangulares el 5 de enero de 1972. El día 11 del mismo mes se transplantaron a las macetas, sembrando 2 por maceta a 10 cm entre planta y 50 cm entre surco. A partir del 15 de enero se midió la altura diaria de las plantas de frijol teniendo en cuenta el último par de hojas.

En vista de que las plantas no se desarrollaron satisfactoriamente en las primeras semanas de crecimiento se decidió hacer aplicaciones con fertilizante foliar "Superfertil" al 1%, que contenía Nitrógeno 10%,  $P_2O_5$  20%,  $K_2O$  10%, sulfato de Cu, sulfato de hierro, sulfato de magnesio, sulfato de zinc, cloruro de bario, sulfato de manganeso y molibdeno.

En los tratamientos 0,003, 0,006, 0,0125, 0,025, y 0,050 bares la succión se mantuvo a un mismo nivel en los dos tensiómetros hidrostáticos de cada maceta, mientras que en los tratamientos 0,10, 0,20, 0,40, y 0,80, 1,60, 3,20, 6,40 y 12,80 bares al alcanzar la succión máxima se aplicaba agua hasta que la succión descendiera a 0,050 bares.

Para evitar posibles problemas de sales con el agua de riego, se usó agua de lluvia recogida por el techo del invernadero del Laboratorio de Suelos almacenada en barriles cubiertos con pintura asfáltica.

Durante el experimento se registró la temperatura diaria del suelo a 5 cm y 15 cm de profundidad por medio de termómetros marca Weston Testin, modelo 2261 (ver Figura 22) y la temperatura y humedad relativa media, máxima y mínima diaria se determinó por un termohigrografo de la Wilh, Lambrecht, Gottingen.

### 3.13. Rendimiento

Para obtener el rendimiento de cada tratamiento se pesó la cantidad total de semillas producida por la planta y por corrección se uniformizaron todos los tratamientos al 13% de humedad.

### 3.14. Materia seca

El peso en seco para cada planta y tratamiento se determinó después de la cosecha sometiendo el tallo y la parte foliar a 38 °C durante 48 horas en el horno de desecación.

### 3.15. Número de vainas y número de semillas por vaina

Se obtuvo el número de vainas y el número de semillas para cada tratamiento procediendo luego a calcular el número promedio de semillas por vaina.

### 3.16. Determinación del peso de la semilla

La determinación del peso de las semillas para ser comparable entre sí, se estandarizó a un contenido de humedad de 13% mediante la siguiente fórmula:

$$Pf = Pi \frac{(100 - Hi)}{(100 - Hf)} \quad [9]$$

donde:

Pf = peso final de la semilla en gramcs

Pi = peso inicial (peso de la semilla luego de la cosecha)

Hi = humedad inicial (se determinó por medio de un higrómetro de semillas Stinlite, tipo G)

Hf = humedad final o de estandarización del rendimiento igual al 13%.

### 3.17. Análisis estadístico

Se hicieron análisis de variancias para separar los efectos y comparaciones de clases no ortogonales (rangos múltiples), por medio de la prueba de Duncan para detectar la significancia entre los tratamientos y aislar el efecto del mejor tratamiento.

Curvas de crecimiento estimadas fueron obtenidas de valores observados, ajustando la función logística o de crecimiento.

$$Y = \frac{\beta_0}{1 + \beta_1 e^{-\beta_2 x}} \quad [10]$$

donde:

Y = crecimiento esperado, en cm

$\beta_0$  = crecimiento máximo de las plantas

$\beta_1$  = constante relacionada con el crecimiento de la planta

$\beta_2$  = constante de crecimiento exponencial

x = edad de la planta en semanas

Se analizaron los resultados de succión y rendimiento, succión y materia seca de tratamientos más húmedos, es decir los que corresponden a las succiones 0,003, 0,006, 0,0125, 0,025 y 0,050 bares, usando el modelo de regresión logarítmica.

$$Y = \beta_0 X_i^{\beta_1} \quad [11]$$

donde:

Y = rendimiento, materia seca en gramos

$X_i$  = succión en bares

$\beta_0, \beta_1$  = constantes de la regresión

Se analizaron los resultados de succión y rendimiento, succión y materia seca de todos los 13 tratamientos, así como también de los tratamientos menos húmedos que corresponden a las siguientes succiones: 0,10, 0,20, 0,40, 0,80, 1,60, 3,20, 6,40 y 12,80 bares, usando el modelo de la función gamma.

$$Y = \beta_0 X^{\beta_1} e^{-\beta_2 X} \quad [12]$$

donde:

Y = rendimiento, materia seca

X = succión en bares

$\beta_1, \beta_2$  = constantes de regresión

Además se usaron los siguientes modelos matemáticos:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X \quad [13]$$

$$Y = \beta_0 X_1^{\beta_1} \quad [14]$$

$$Y = \beta_0 \beta_1^{X_1} \beta_2^{X_2} \quad [15]$$

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2^2 \quad [16]$$

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{12} X_1 X_2 \quad [17]$$

Los resultados experimentales fueron procesados con la computadora IBM 1130 del CTEI-IICA.

#### 4. RESULTADOS

##### 4.1. Rendimiento

La Figura 2 y el Cuadro 7 representan los resultados de rendimiento obtenidos en función de la succión considerando la profundidad del suelo a 5 y 15 cm conjuntamente. Se observa en la Figura 12 a una succión máxima de 5 cm de profundidad correlacionó también una succión máxima a 15 cm de profundidad. Es interesante anotar que a mayor profundidad la succión es menor, ello se debe a que la demanda de agua es mayor a menor profundidad por la mayor actividad del sistema radical del frijol.

Considerando los tratamientos de succiones máximas entre 0,003-0,050 bares, se observa en la Figura 3 y el Cuadro 6 que la producción aumenta rápidamente al incrementar la succión desde 0,003 hasta 0,050 bares. A 0,003 bares se alcanzó la más baja producción de 39,35 g por tratamiento, obteniendo un promedio de 4,95 g por planta y la más alta producción correspondió a la succión de 0,050 bares logrando 163,54 g por tratamiento, correspondiendo a 40,90 g por planta. La tendencia de la curva es logarítmica con un alto índice de asociación de  $R^2$  de 0,89.

El análisis de variancia (Cuadro 11) y la prueba de Duncan (Cuadro 20) indican que el rendimiento es un efecto de las succiones máximas.

Las plantas afectadas por estas succiones sufrieron las consecuencias del exceso de agua, lo cual se observó en el tratamiento de 0,003 bares el que presentó en la parte foliar del cultivo una

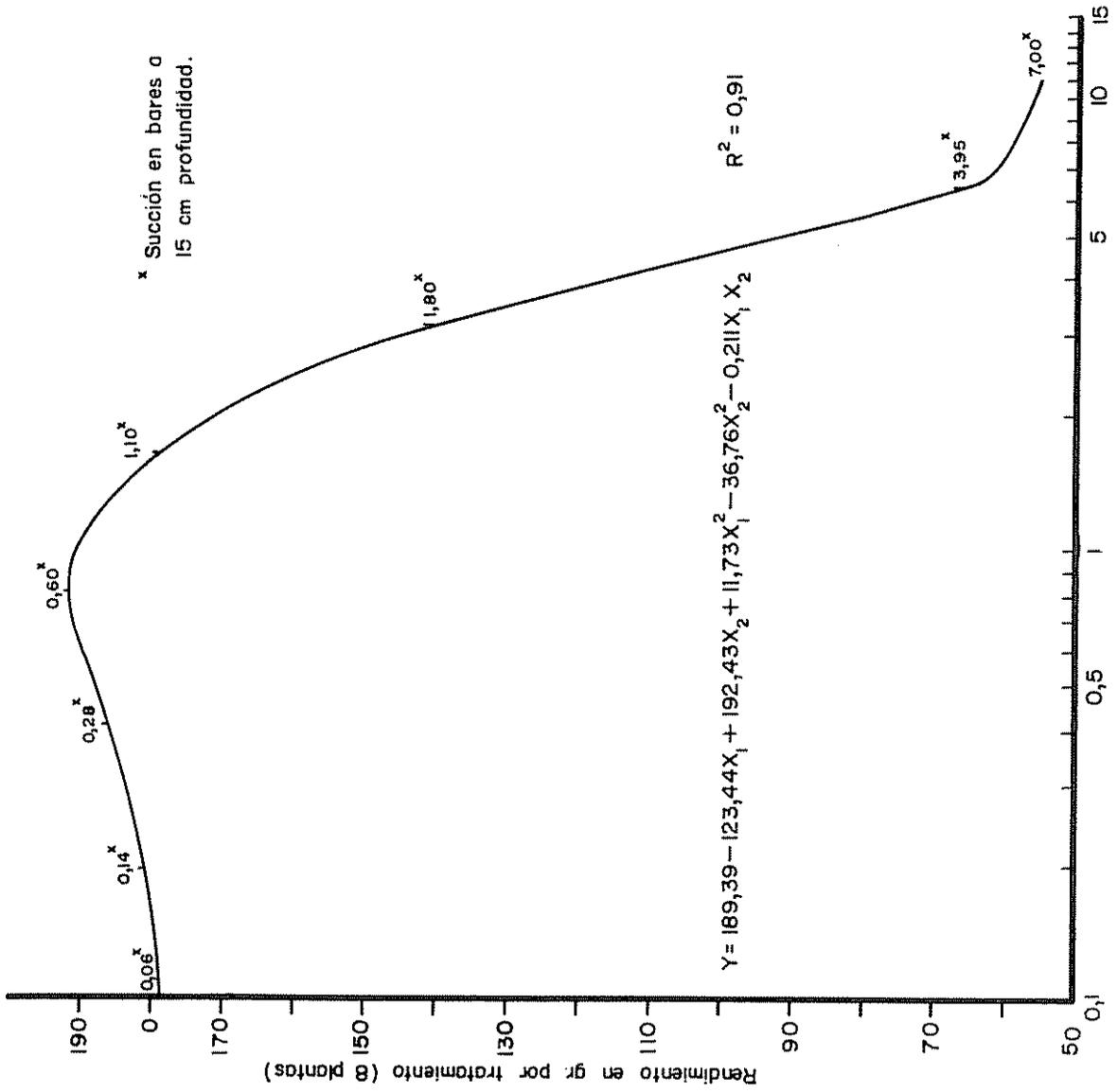


Fig.- 2. Relacion entre el rendimiento y la succion a 5 cm y 15 cm de profundidad.

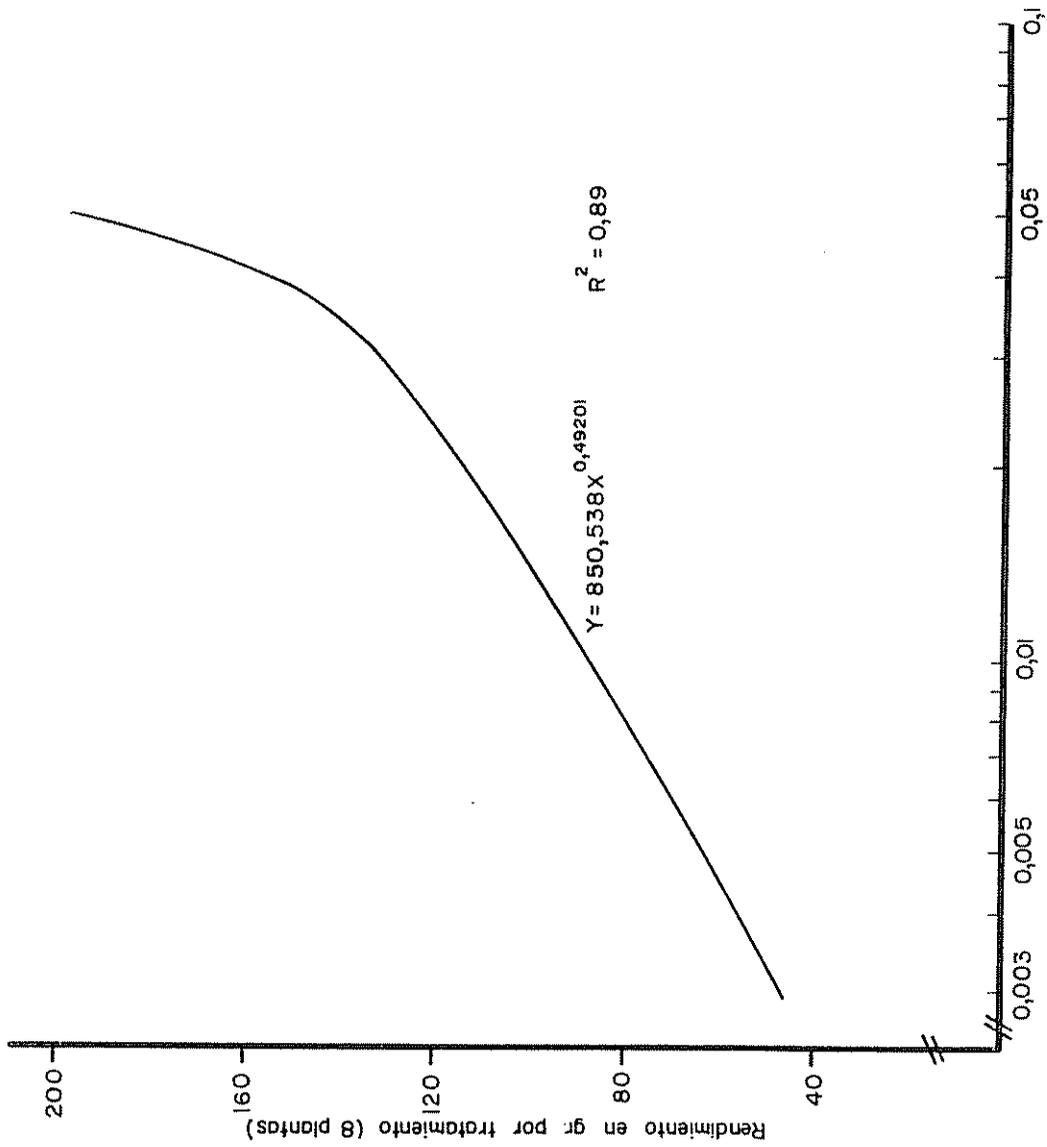


Fig.— 3. Relación entre el rendimiento y la succión a 5 cm de profundidad para los tratamientos 0,003 — 0,050 bares

coloración amarilla bastante intensa.

Teniendo en cuenta los tratamientos de succión máxima entre 0,10 y 12,80 bares el rendimiento también se ve afectado con el incremento de la succión (Figura 4). A una succión de 0,80 bares se obtuvo la máxima producción de 229,54 g y la mínima correspondió a 12,80 bares de 56,72 g por tratamiento. A 15 cm de profundidad las succiones máximas de mayor rendimiento están entre 0,14 y 0,60 bares correspondiéndole a esta última la máxima producción y la mínima se obtuvo a 7,0 bares (Cuadros 6, 9 y 10). Los resultados obtenidos corresponden a una función gamma que tiene alto coeficiente de determinación  $R^2 = 0,88$  y  $0,90$  a las dos profundidades estudiadas, como se puede apreciar en la Figura 4.

Los análisis de variancia (Cuadros 12, 13) y las prueba de Duncan (Cuadros 21, 22) mostraron diferencias significativas entre tratamientos y separan el tratamiento de mayor rendimiento. Las diferentes succiones afectaron notablemente el rendimiento del frijol según se aprecia en estos Cuadros 6, 9 y 10.

La Figura 5 representa el efecto de todos los tratamientos desde 0,003 hasta 12,80 bares e incluye los porcentajes de pérdida de la producción máxima obtenida a 0,80 bares. Entre 1,80 y 3,20 bares se obtiene una pérdida del 10 al 30 por ciento y sigue aumentando al incrementarse la succión. En esta Figura 5 se observa que el frijol responde más a las succiones bajas, es decir que sus tejidos resisten menos los efectos del exceso de agua.

Analizando la Figura 6 se nota que el rendimiento aumenta gradualmente al aumentar la R.D.O. hasta un valor óptimo de 198 g que se

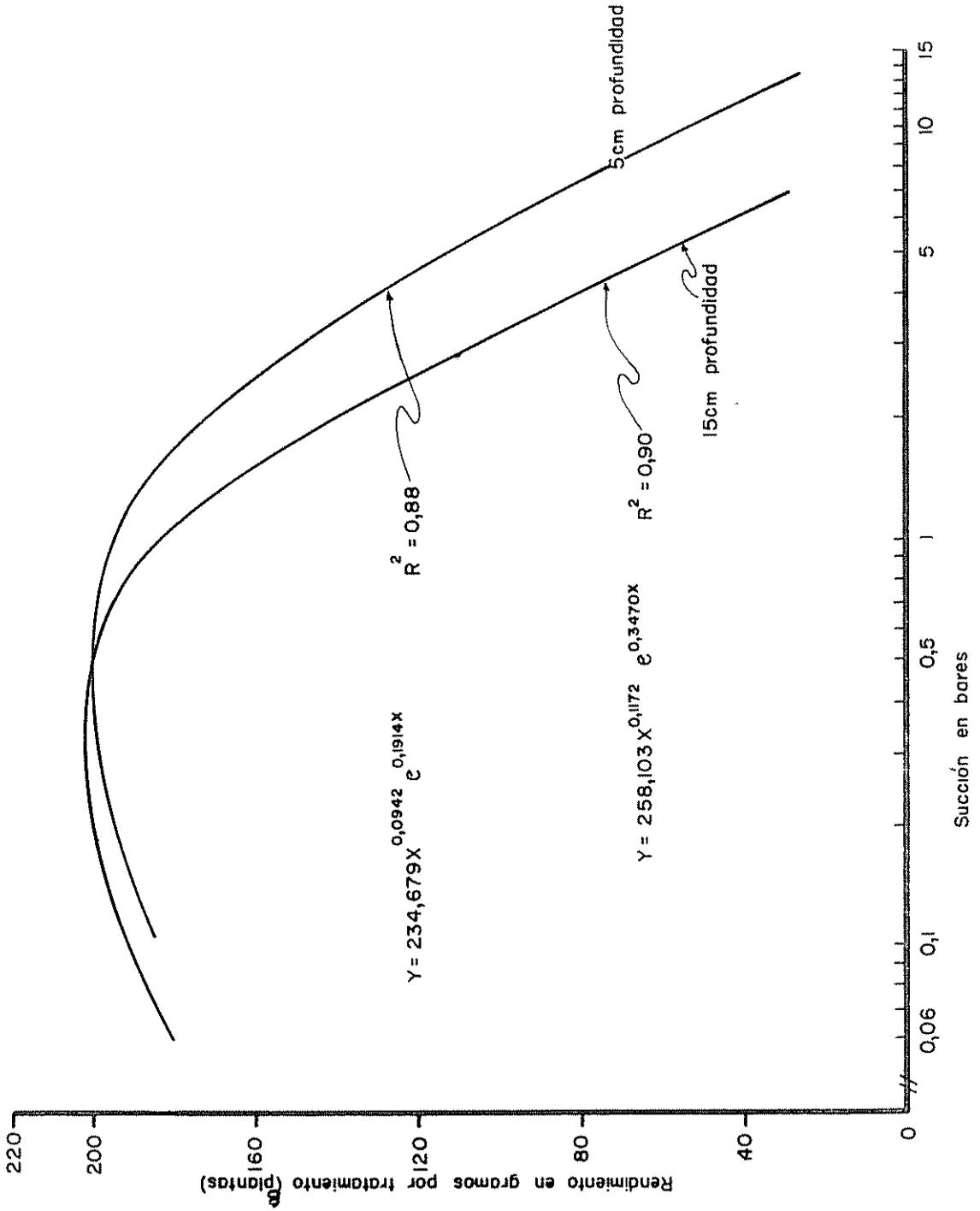


Fig.- 4. Función gamma entre el rendimiento y la succión a 5 y 15 cm de profundidad para los tratamientos 0,10 - 12,80 bares

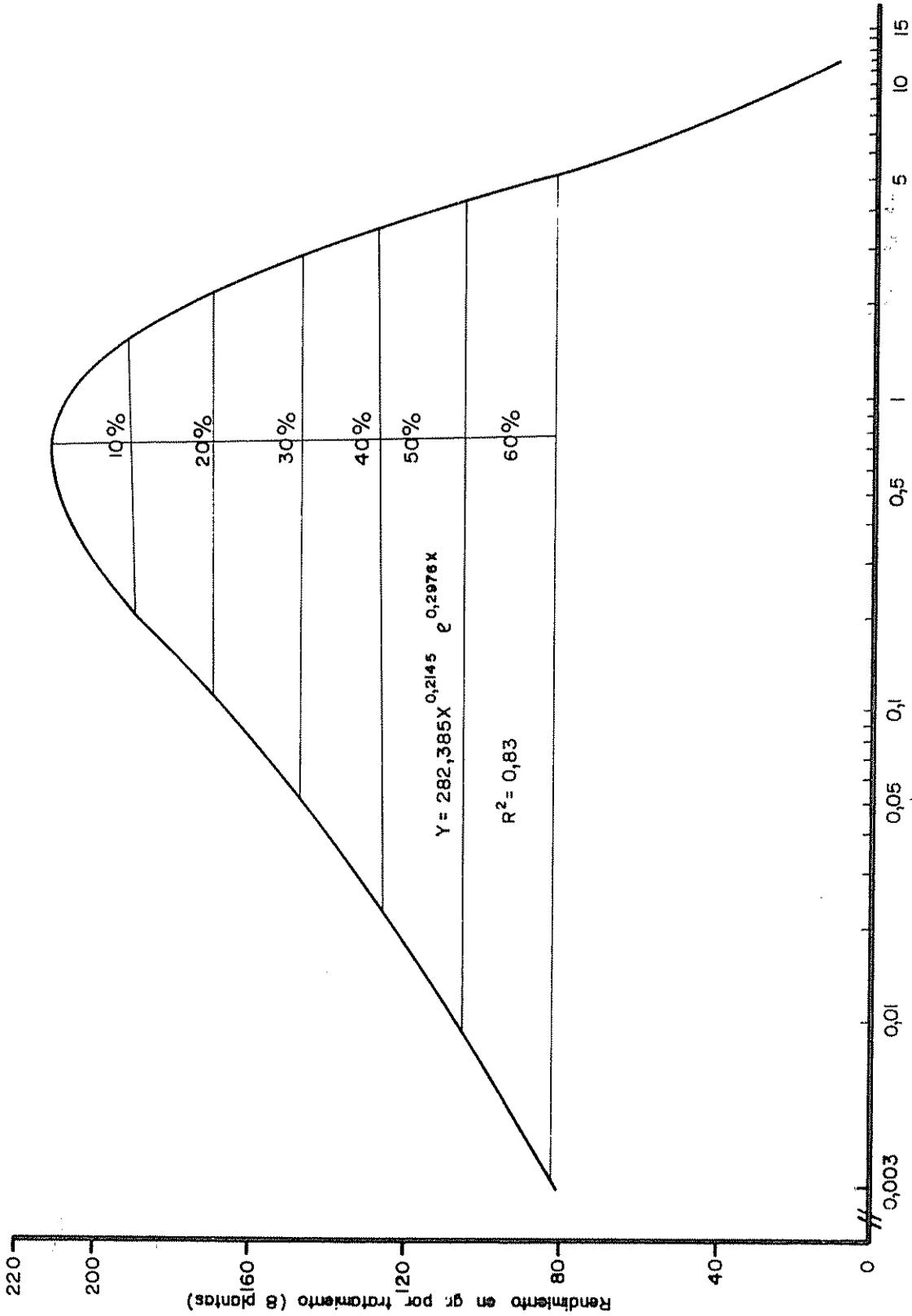


Fig.— 5. Relación entre el rendimiento y la succión a 5 cm de profundidad para todos los tratamientos 0,003 -12,80 bares. Porcentajes de pérdida del rendimiento máximo estimado con relación al aumento de la succión.

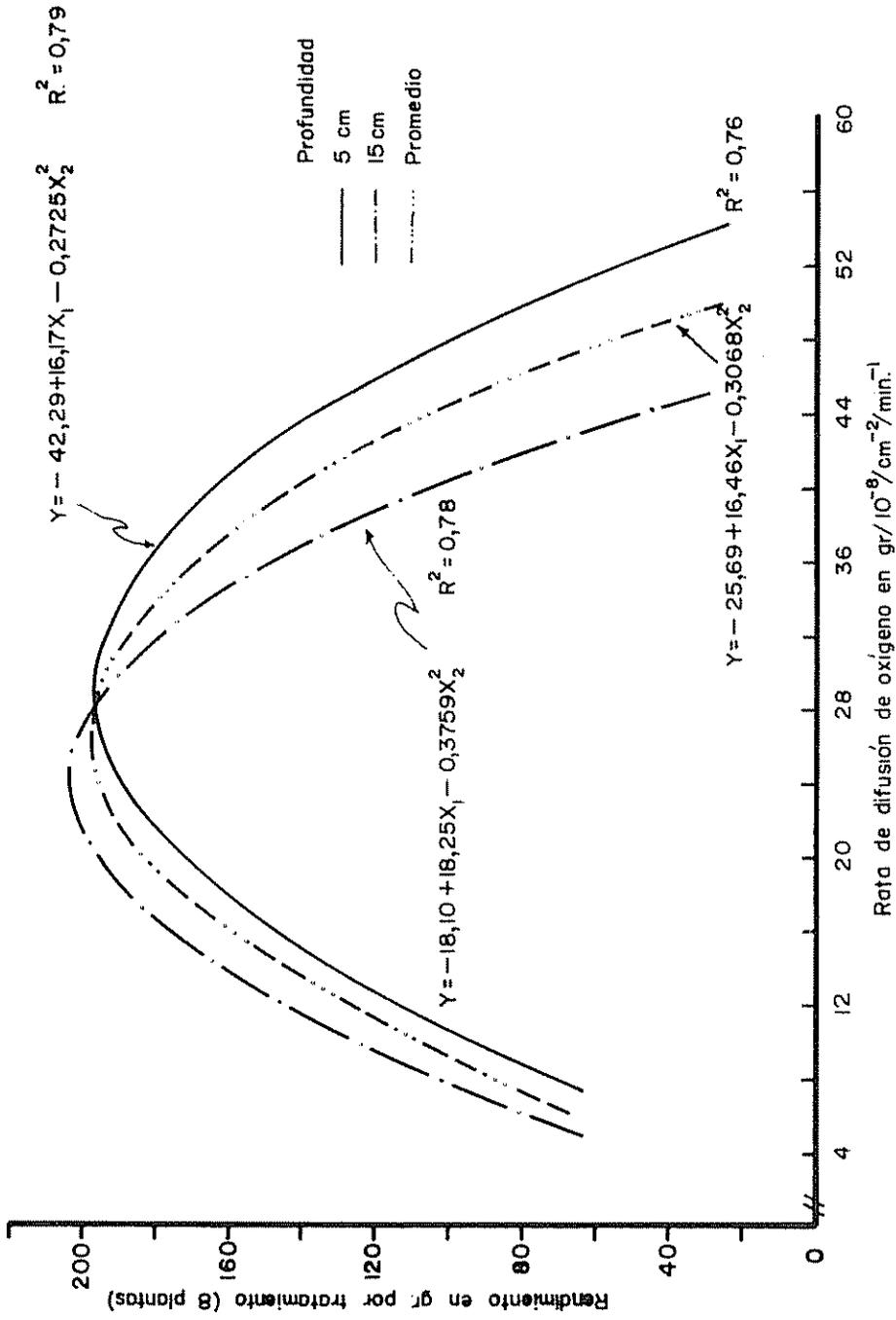


Fig.— 6. Relación entre el rendimiento y la rata de difusión de oxígeno.

obtiene cuando la R.D.O. es de  $28 \text{ g } 10^{-8} \text{ cm}^{-2} \times \text{min}^{-1}$  a 5 cm de profundidad y de  $204 \text{ g}$  que se obtiene a  $24 \text{ g } \times 10^{-8} \text{ cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$  de R.D.O. a 15 cm de profundidad. Es interesante destacar que al aumentar la R.D.O. y la succión disminuye el rendimiento.

En los Cuadros 2 y 3 se representan las relaciones que existen entre la succión y el rendimiento considerando la profundidad del suelo a 5 cm y 15 cm en forma individual y conjunta.

#### 4.2. Materia seca

La Figura 7 en la que se representa una ecuación cuadrática múltiple se observa que la materia seca es un efecto de los tratamientos de succión máxima desde 0,10 hasta 12,80 bares a 5 cm de profundidad y desde 0,06 hasta 7,00 bares a 15 cm de profundidad. Se observa que la succión de mayor producción corresponde a 0,80 bares y a 0,60 bares a 5 y 15 cm de profundidad respectivamente.

La Figura 8 señala la influencia de la succión sobre la materia seca presentando la tendencia de una ecuación logarítmica, lo que indica un aumento rápido de la materia seca al disminuir el agua del suelo. El andeva (Cuadro 15) y la prueba de Duncan (Cuadro 24) también enseñan que existe diferencia significativa entre tratamientos y separa el efecto del tratamiento 0,025 bares como el de mejor producción de materia seca.

La Figura 9 presenta la misma tendencia pero ajustándose a un modelo de función gamma. Al incrementarse la succión máxima, la cantidad de materia seca obtenida desciende.

El análisis de variancia (Cuadros 15, 16) y las pruebas de Duncan

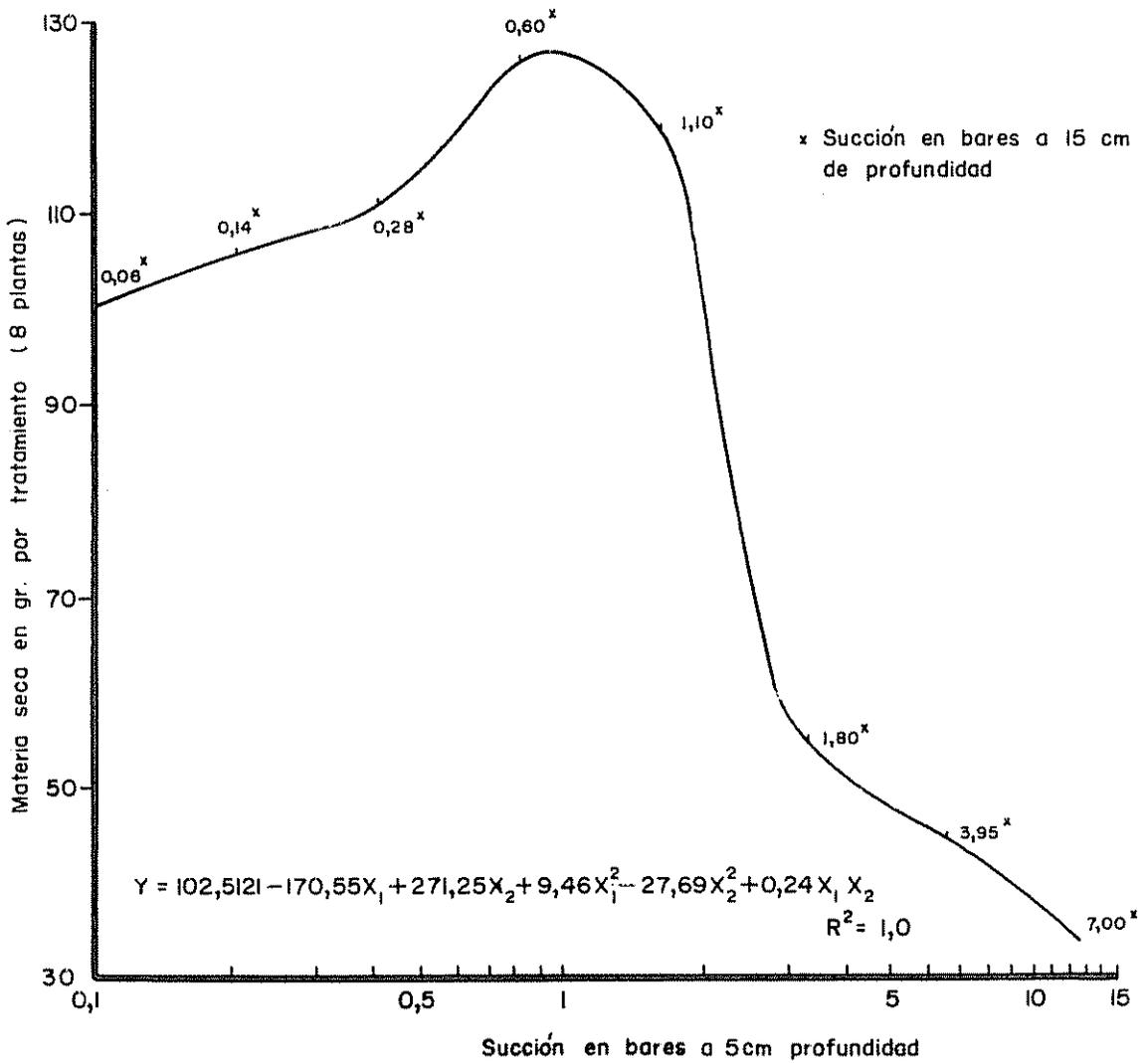


Fig-7. Relación entre la materia seca y la succión a 5 y 15 cm profundidad para los tratamientos 0,10 - 12,80 bares

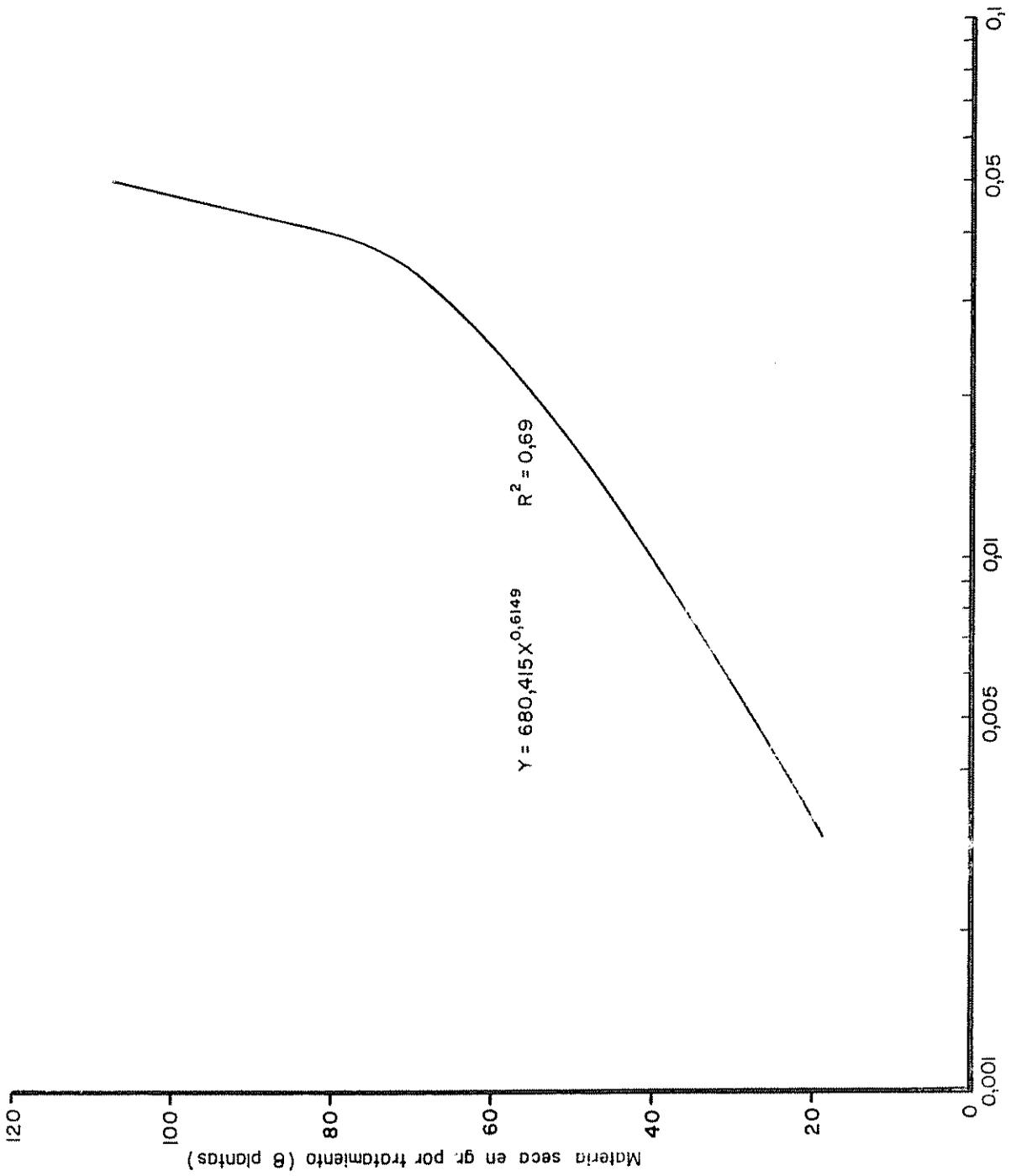


Fig.- 8. Relación entre la materia seca y la succión a 5 cm de profundidad  
0,003-0,050 bares.

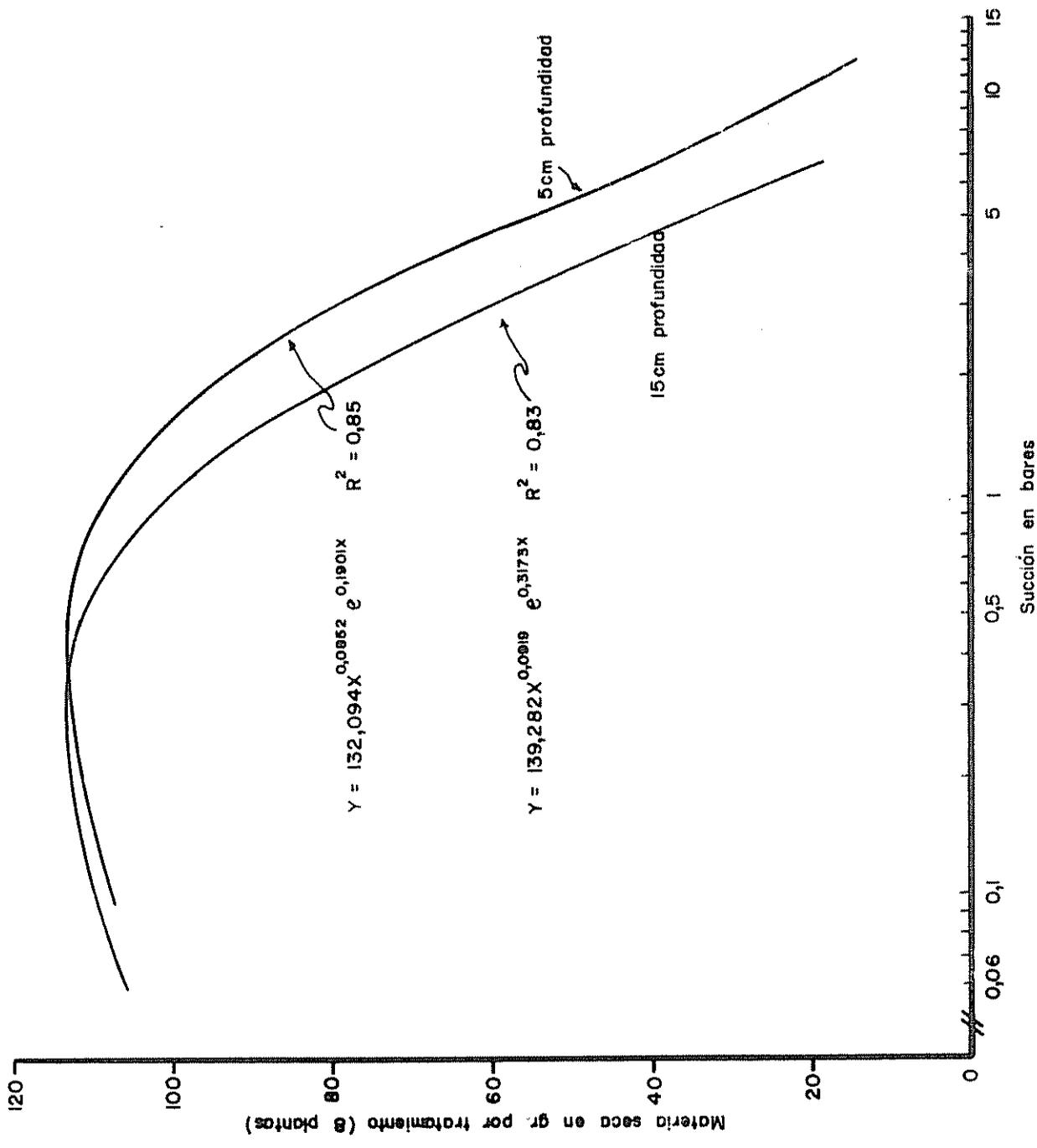


Fig.- 9 Relación entre materia seca y succión a 5 y 15 cm de profundidad para los tratamientos 0,10 - 12,80 bares

(Cuadros 24, 25) señalan que todos los tratamientos mostraron efectos significativos. Igual efecto se puede apreciar en los Cuadros 8 a 10. En la Figura 10 se observan las pérdidas de materia seca por aumentos y descensos en la succión para todos los tratamientos. El modelo corresponde a la función gamma y el ajuste de la curva ( $R^2 = 0,80$ ) es menor cuando se consideran todos los tratamientos que cuando se considera solamente los tratamientos 0,10 - 12,80 bares. Se observa que las pérdidas del rendimiento máximo son menos rápidas entre las succiones 0,80 y 12,80 bares y es lenta cuando estas van desde 0,80 hasta 0,003 bares.

Considerando la Figura 11 la producción de materia seca aumenta al aumentar la R.D.O. hasta cierto punto y luego decrece al aumentar el R.D.O., obteniéndose una producción mínima de materia seca de 22 g a  $49 \text{ g} \times 10^{-8} \text{ cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$  de R.D.O. y una producción máxima de 110 cuando la R.D.O. es de  $24 \text{ g} \times 10^{-8} \text{ cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$  teniendo en cuenta la curva promedio.

En los Cuadros 4 y 5 se representan las relaciones que existen entre la succión y la materia seca considerando la profundidad del suelo en forma individual y en forma conjunta.

#### 4.3. Número de vainas

Los Cuadros 9 y 10, 17 a 19 del análisis de variancia y 26 a 28 de las pruebas de Duncan mostraron diferencias significativas entre las succiones usadas como tratamientos, observándose que el de mayor producción corresponde a 0,80 bares de succión a 5 cm de profundidad y a 0,60 bares a 15 cm de profundidad.

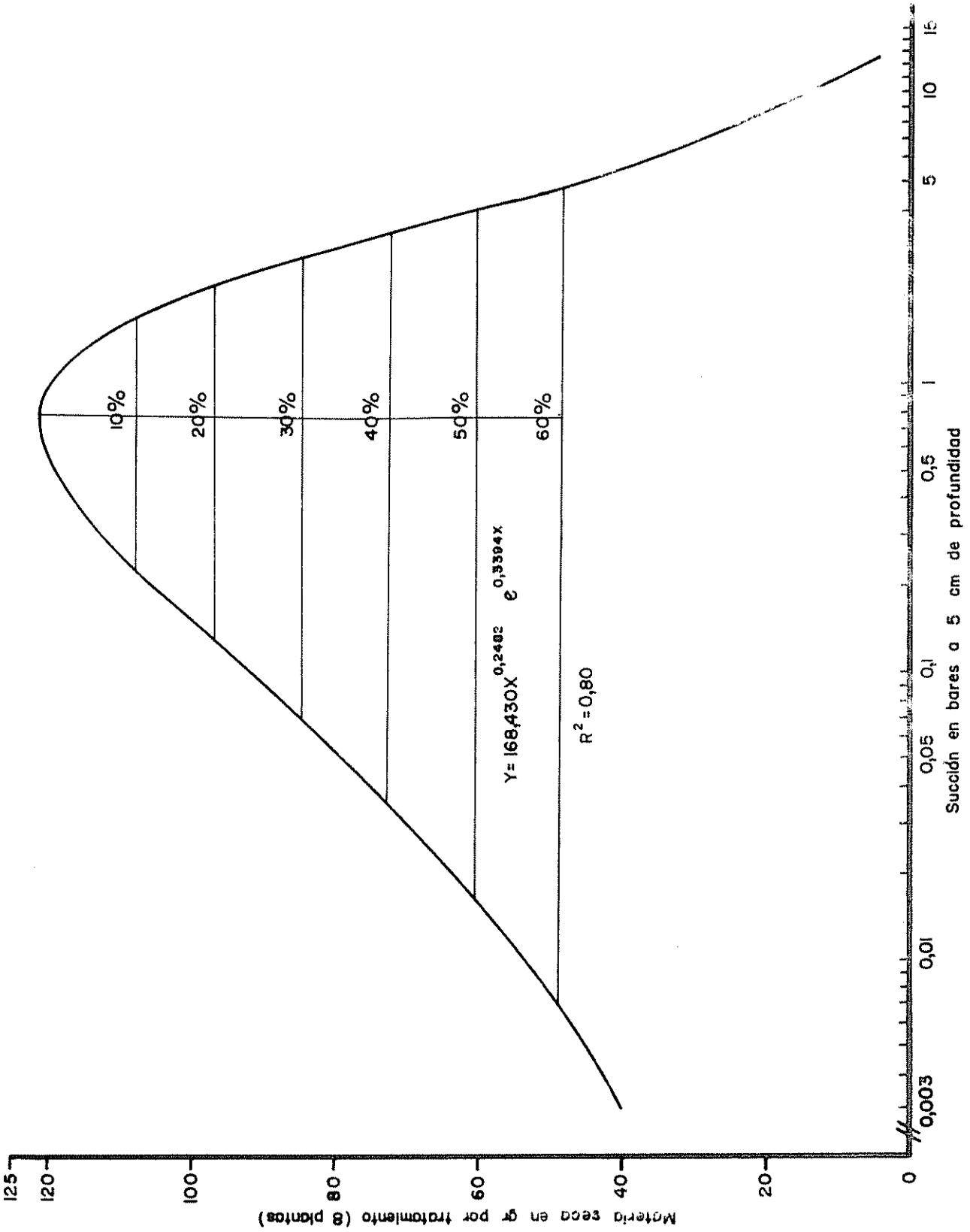


Fig.-10 Relación entre la materia seca y la succión a 5 cm de profundidad para todos los tratamientos (0,003 -12,80 bares) Porcentaje de pérdida de la materia seca máxima estimada con relación al aumento de la succión.

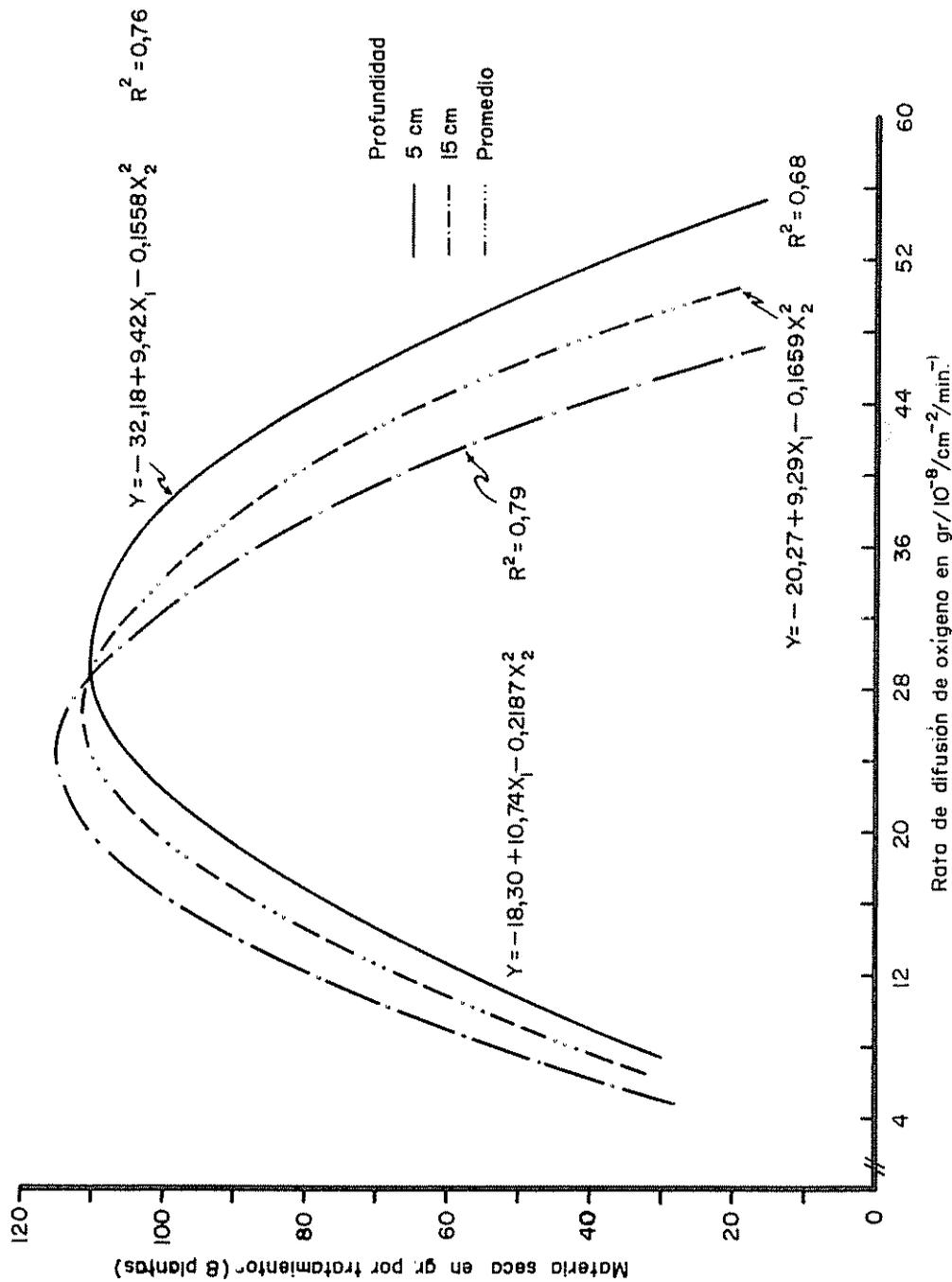


Fig.— II Relación entre la materia seca y la rata de difusión de oxígeno.

#### 4.4. Succión del agua del suelo

En el Cuadro 30 y en la Figura 12 se registran los valores de succión máxima del agua del suelo a 5 cm de profundidad y los promedios semanales de extracción de agua por el frijol a 5 cm de profundidad. A medida que aumenta la edad la planta la demanda de agua es mayor, siendo ligera en las primeras semanas y fuerte en las finales. Para las succiones más altas en las primeras semanas no hubo necesidad de regar por cuanto el suelo se encontraba húmedo debido a la adición de soluciones nutritivas antes de realizar el experimento. También se aprecia que en los tratamientos de succión 0,003, 0,006 y 0,0125 bares a 15 cm de profundidad ya no existe succión sino presión por estar la tabla de agua encima del punto donde se encuentra el tensiómetro hidrostático a esta profundidad, como puede observarse en el Cuadro 29.

En la Figura 13 se observa que a mayor succión corresponden valores más altos de R.D.O. y este disminuye con el incremento de la profundidad. La tendencia de los resultados obtenidos muestran que se ajustan a un modelo logarítmico de alta confiabilidad.

#### 4.5. Espacio aéreo

En el Cuadro 33 y en la Figura 14 se observa como al incrementar se la succión se aumenta el espacio aéreo. El espacio aéreo está comprendido entre 6,2 por ciento cuando el suelo está inundado y de 25,6 por ciento cuando la succión corresponde a 0,050 bares.

En las Figuras 15, 16 se observan efectos diferenciales en el

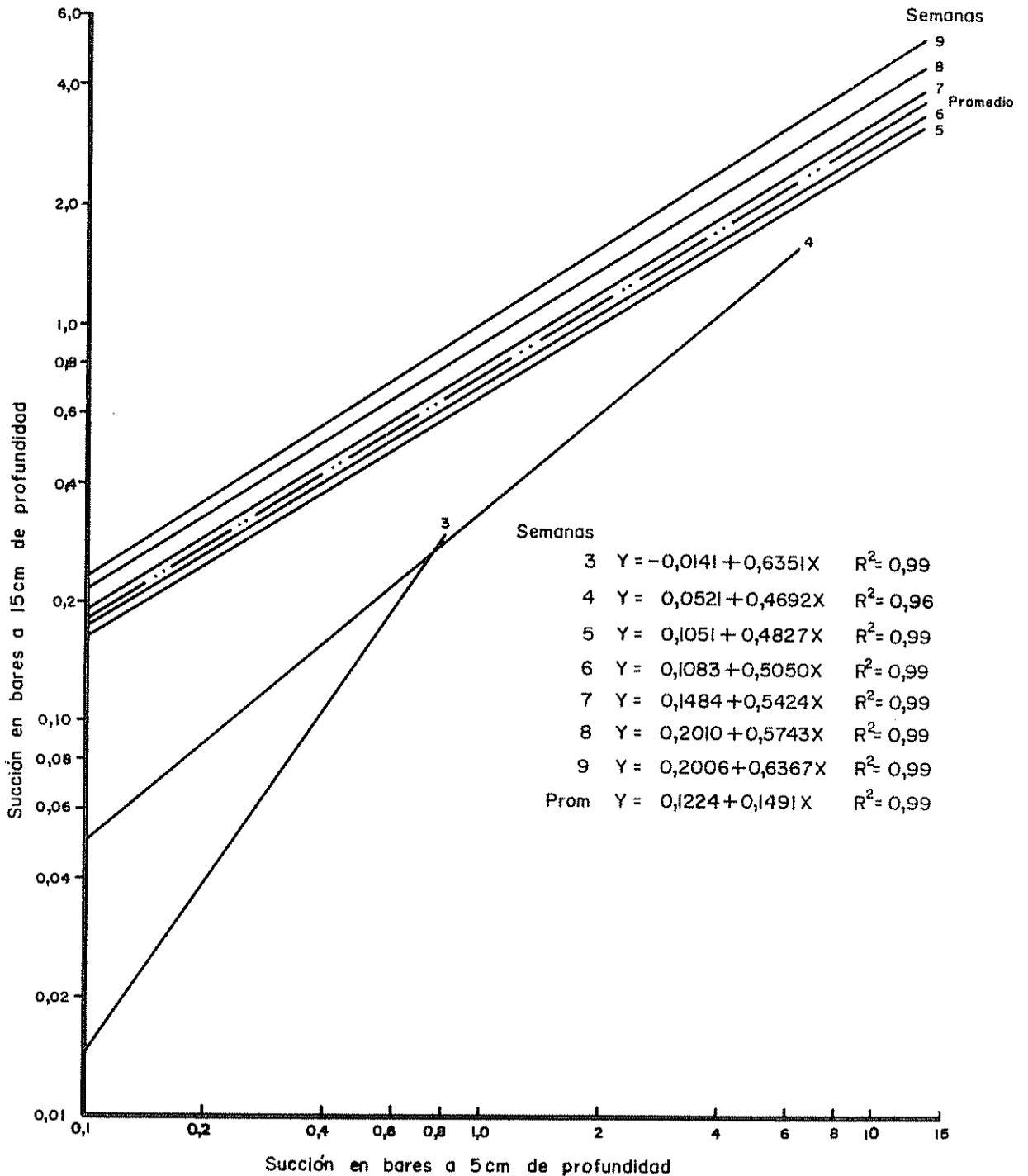


Fig.- 12. Relaciones entre la succión a 5 cm y la succión a 15 cm de profundidad en función del tiempo en semanas.

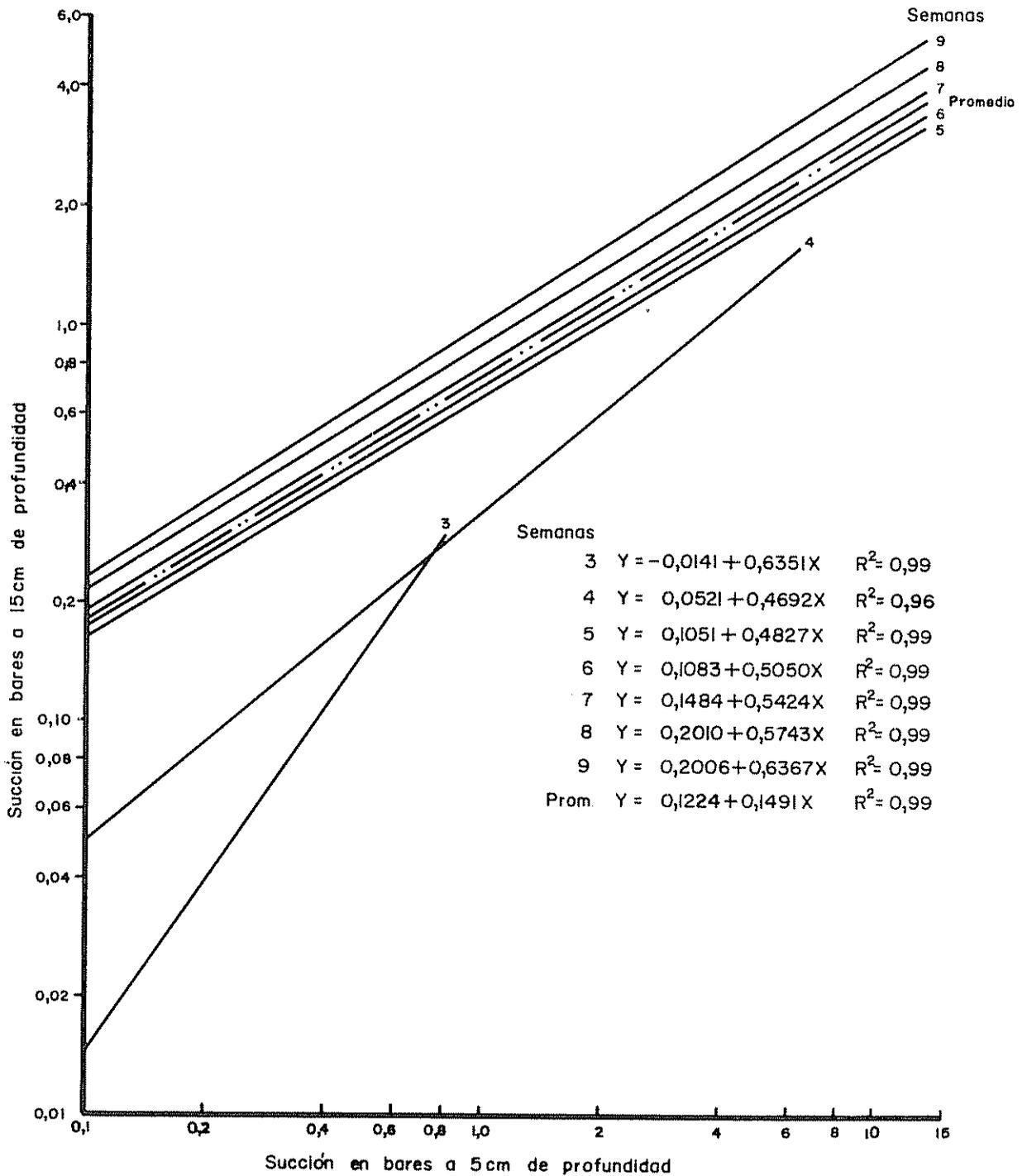


Fig.- 12. Relaciones entre la succión a 5 cm y la succión a 15 cm de profundidad en función del tiempo en semanas.

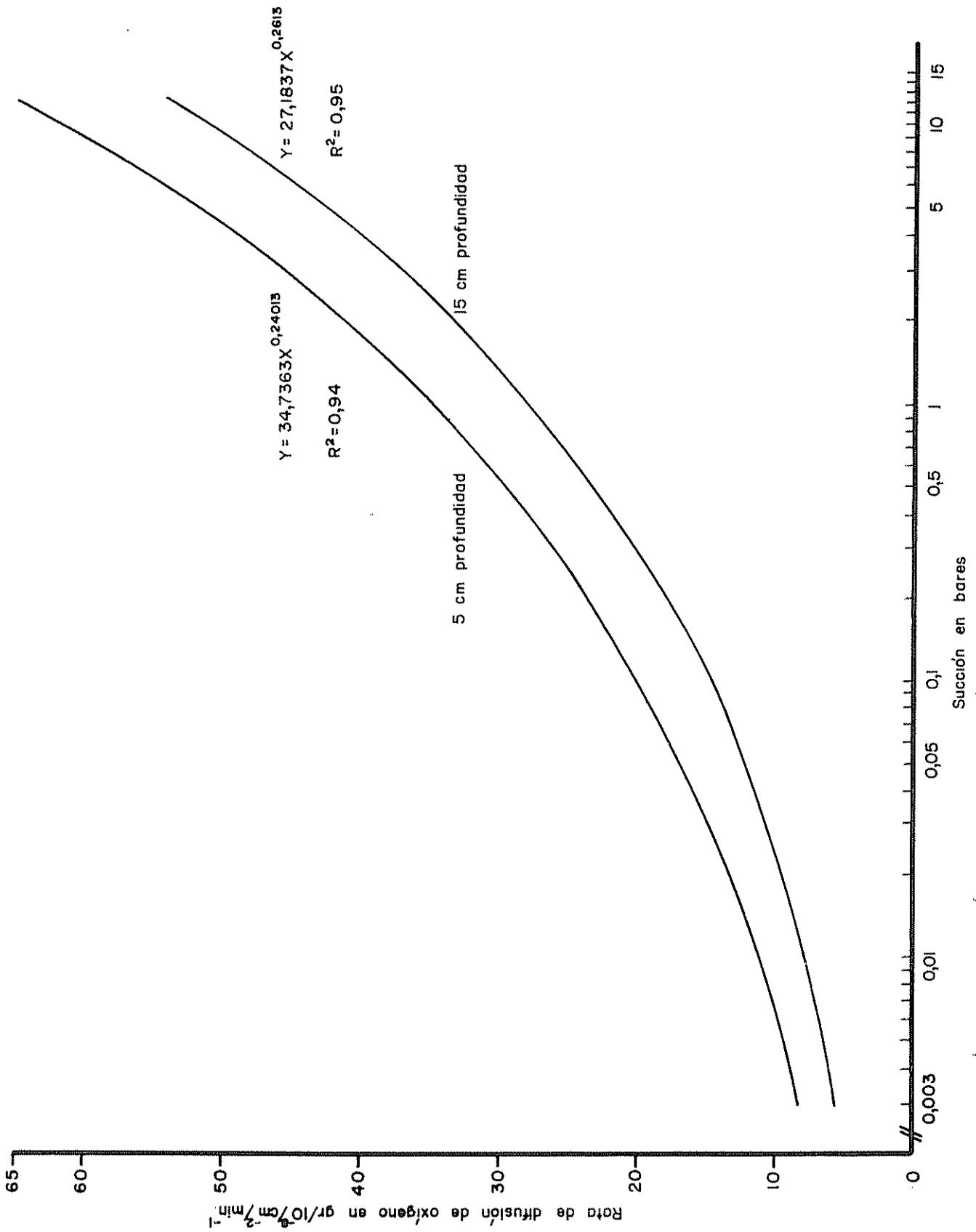


Fig.— 13 Relación entre la succión y la rata de difusión de oxígeno del electrodo de platino a 5 y 15 cm de profundidad

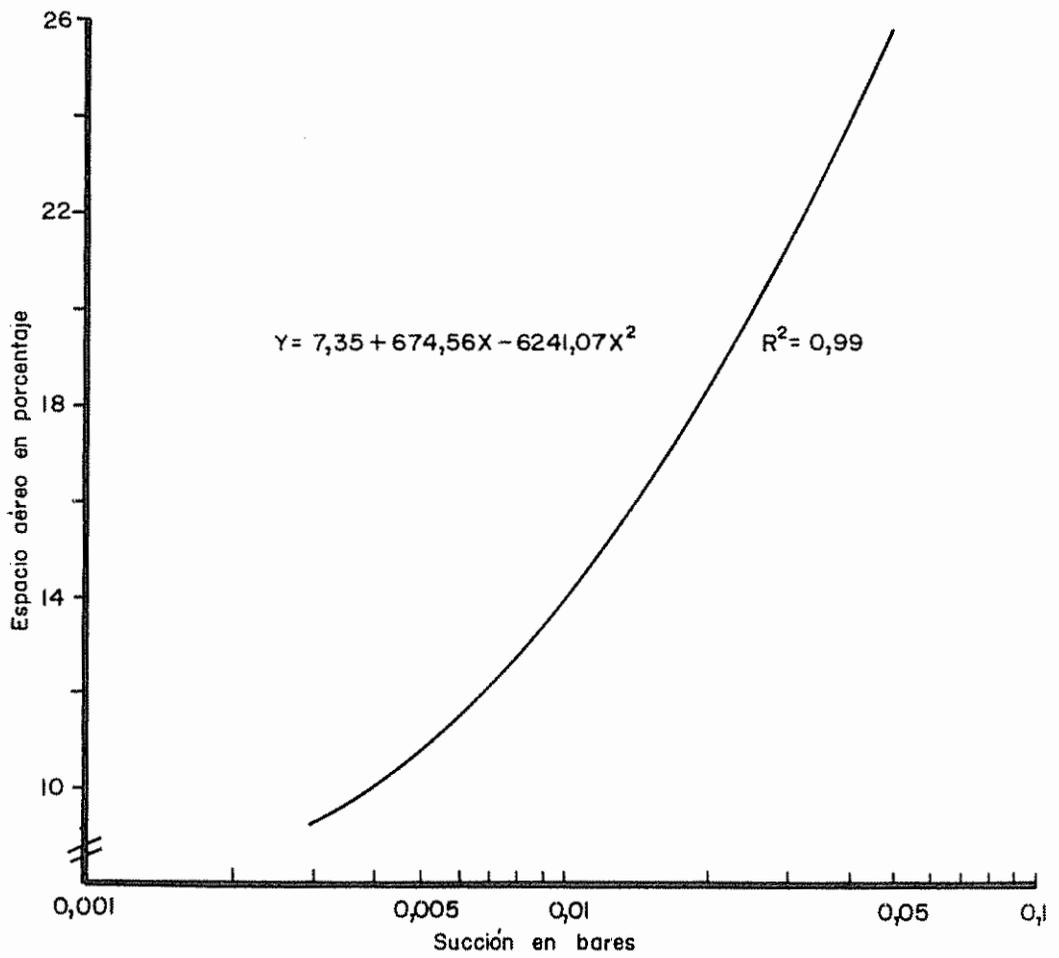


Fig.- 14 Relación entre el espacio aéreo y la succión a 5 cm de profundidad.

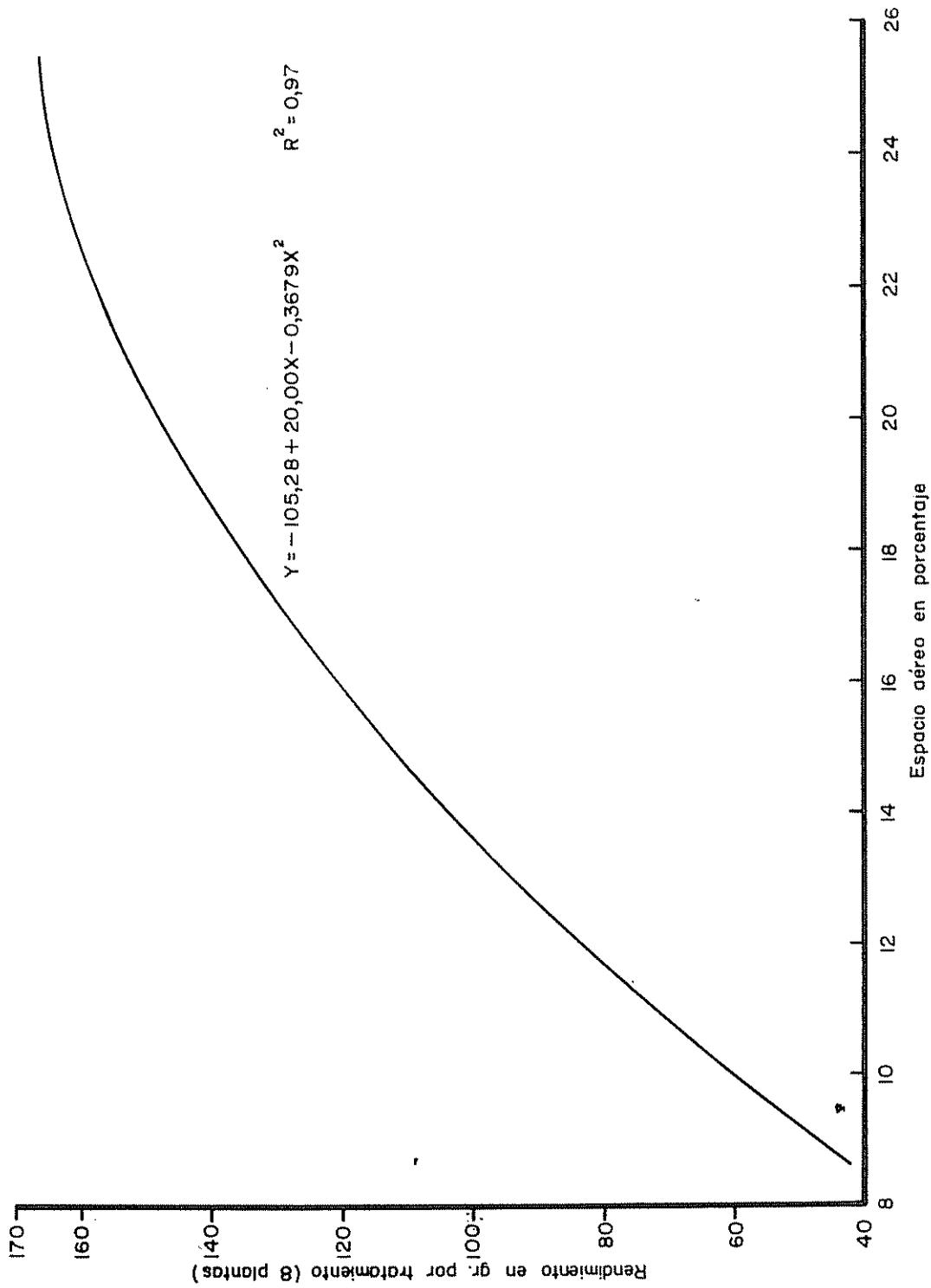


Fig.- 15 Relación entre el rendimiento y el espacio aéreo para los tratamientos con succión 0,003 - 0,050 bares

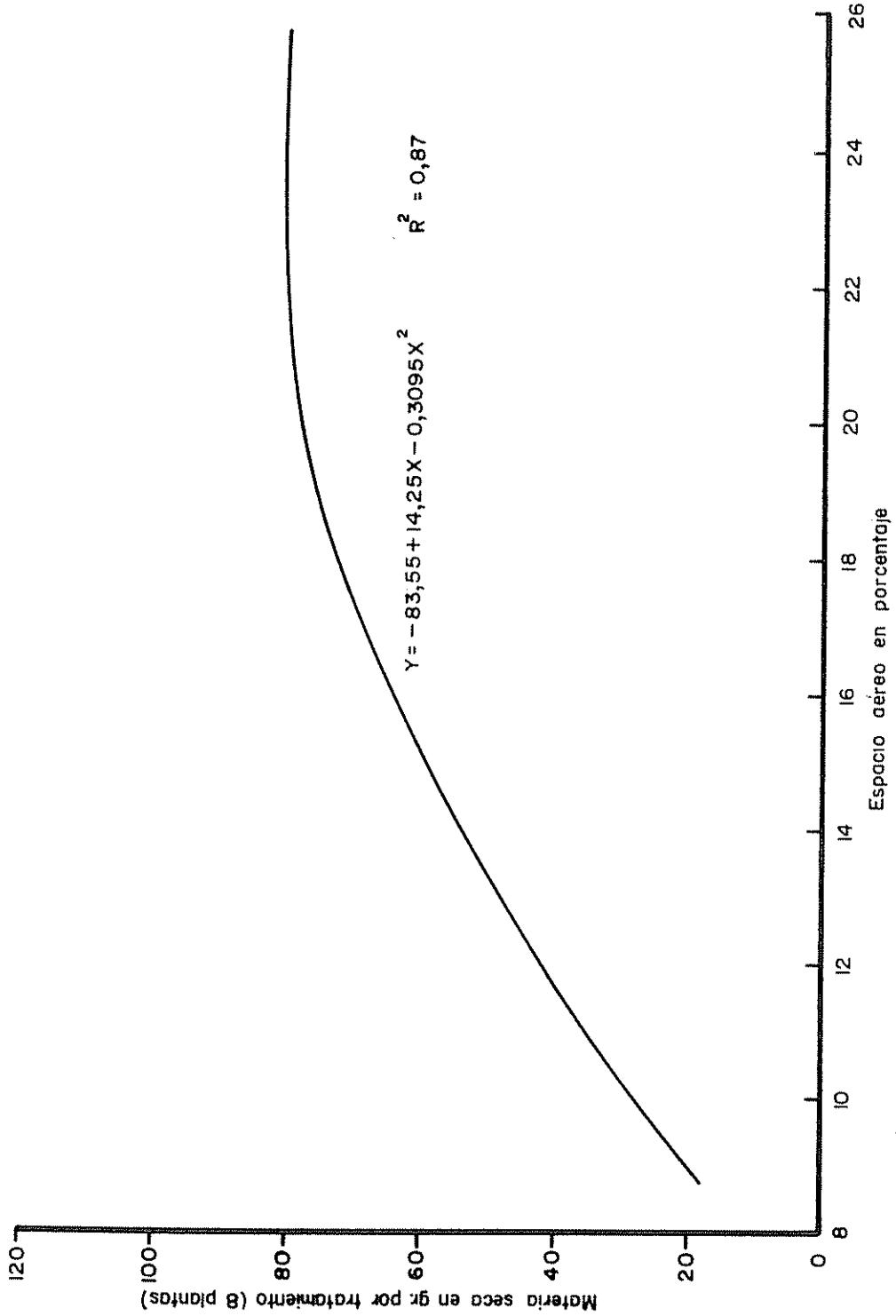


Fig.- 16 Relación entre la materia seca y el espacio aéreo para los tratamientos con succión 0,003 - 0,050 bares.

rendimiento y la materia seca, encontrándose una zona donde la tendencia de la curva se estabiliza ligeramente y aunque aumenta el espacio aéreo no se incrementa ninguna de estas dos características.

Según la Figura 17 y los Cuadros 37 y 38 se aprecia que la R.D.O. se reduce al incrementarse la profundidad del suelo y aumenta linealmente con el espacio aéreo, variando el flujo de oxígeno entre 8,0 y 5,0  $\text{g} \cdot 10^{-8} \text{ cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$  a un 9 por ciento de espacio aéreo bajo condiciones muy húmedas (0,003 bares) y obteniendo valores máximos entre 17 y 13  $\text{g} \cdot 10^{-8} \text{ cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$  a un 26 por ciento de espacio aéreo bajo condiciones húmedas (0,050 bares), teniendo en cuenta la profundidad del suelo a 5 cm y 15 cm.

#### 4.6. Crecimiento de las plantas de frijol

El análisis estadístico de las curvas de crecimiento señalan que las plantas de frijol respondieron significativamente a la succión del agua del suelo (Fig. 18, Cuadro 42). Se observa que el máximo desarrollo alcanzado por las plantas corresponde a 74,23 cm de altura a una succión máxima de 0,80 bares y el menor crecimiento se alcanzó cuando la succión máxima fue 0,003 y 12,80 bares que corresponden a 47,66 cm y 49,74 cm respectivamente (Cuadro 43).

En la Figura 19 se observa que la R.D.O. se incrementa con el crecimiento de la planta, así a la décima semana la demanda de flujo de oxígeno promedio alcanzó valores máximos de  $29,5 \text{ g} \cdot 10^{-8} \text{ cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$  a 5 y 15 cm de profundidad siendo la mínima demanda a la tercera semana de  $23,8 \text{ g} \cdot 10^{-8} \text{ cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ . El Andeva (Cuadros 39-41) señala las diferencias entre R.D.O. y tiempo en semanas.

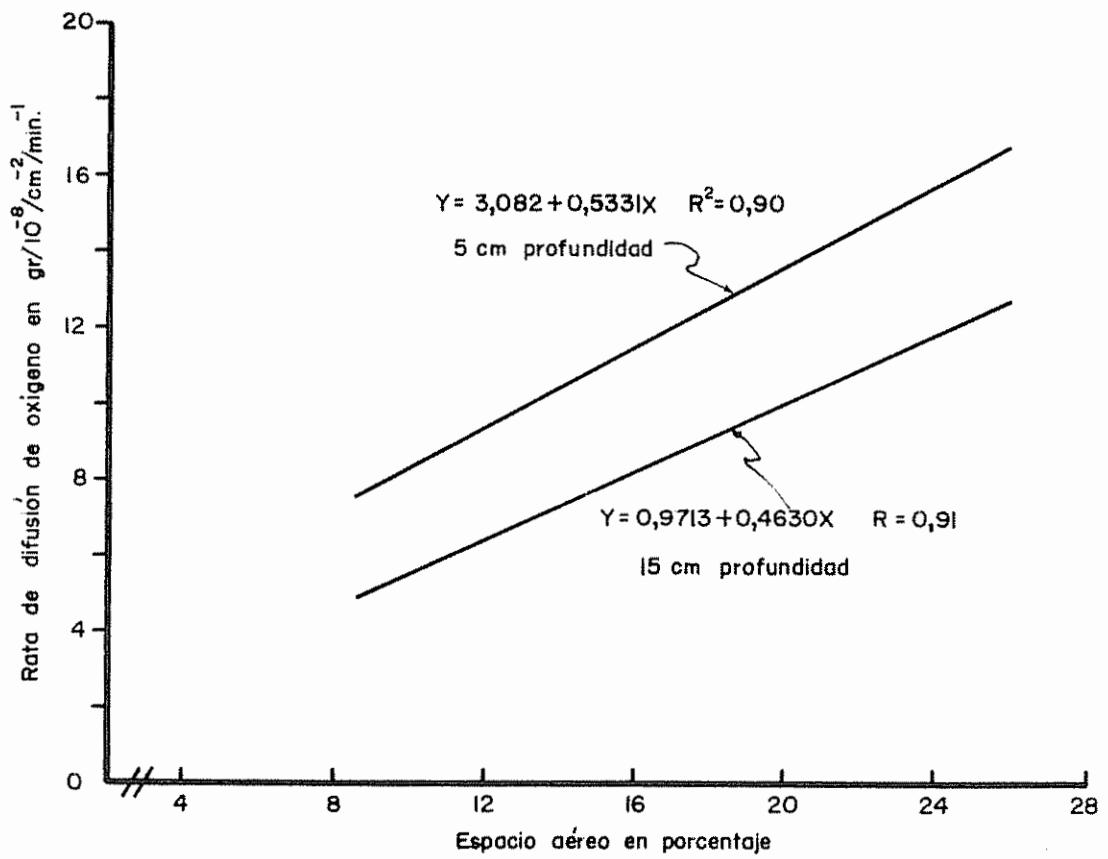


Fig.—17 Relación entre la rata de difusión de oxígeno y el espacio aéreo a 5 y 15 cm de profundidad

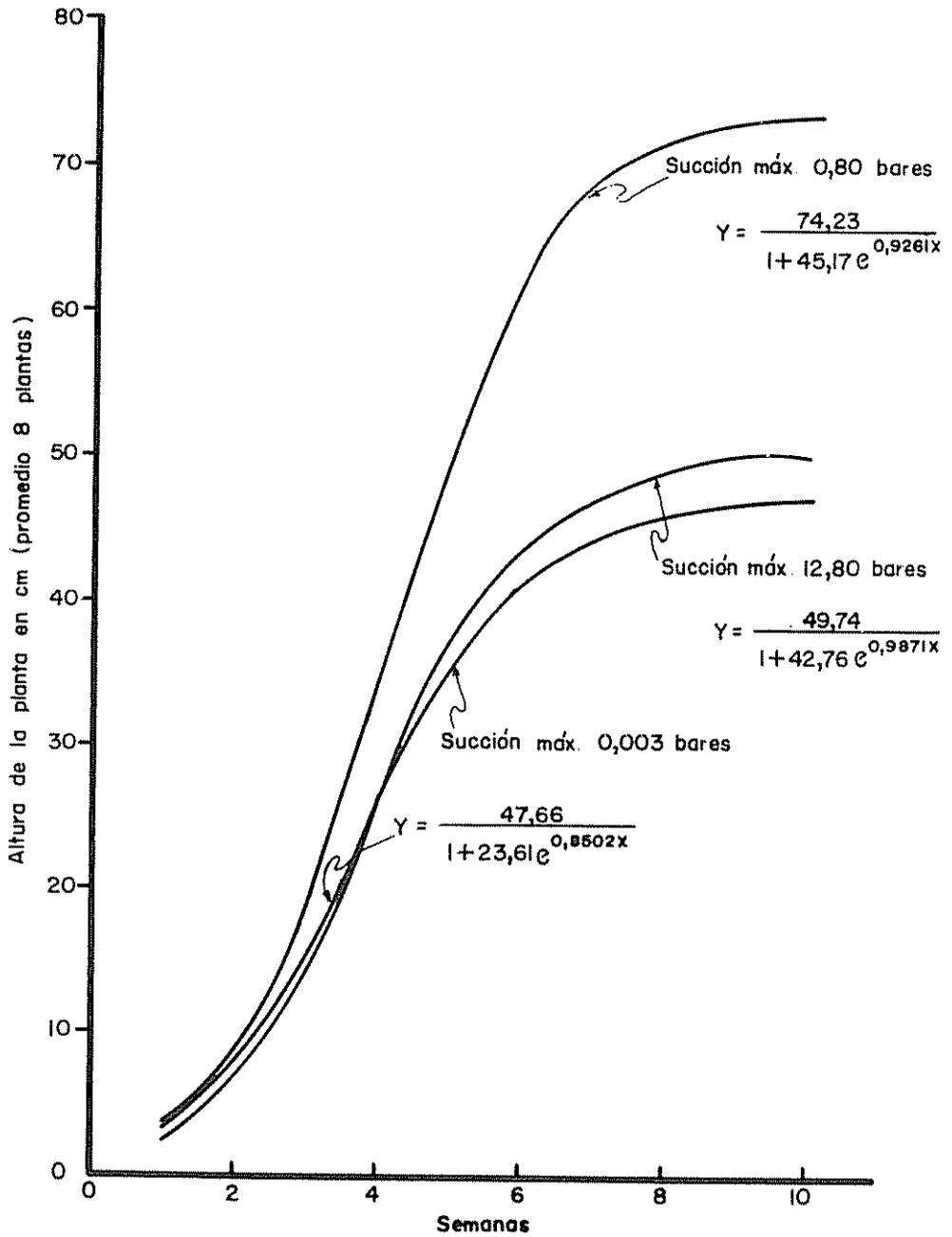


Fig.—18 Crecimiento del frijol para las succiones extremas 0,003 y 12,80 bares y tratamiento de óptima producción 0,80 bares.

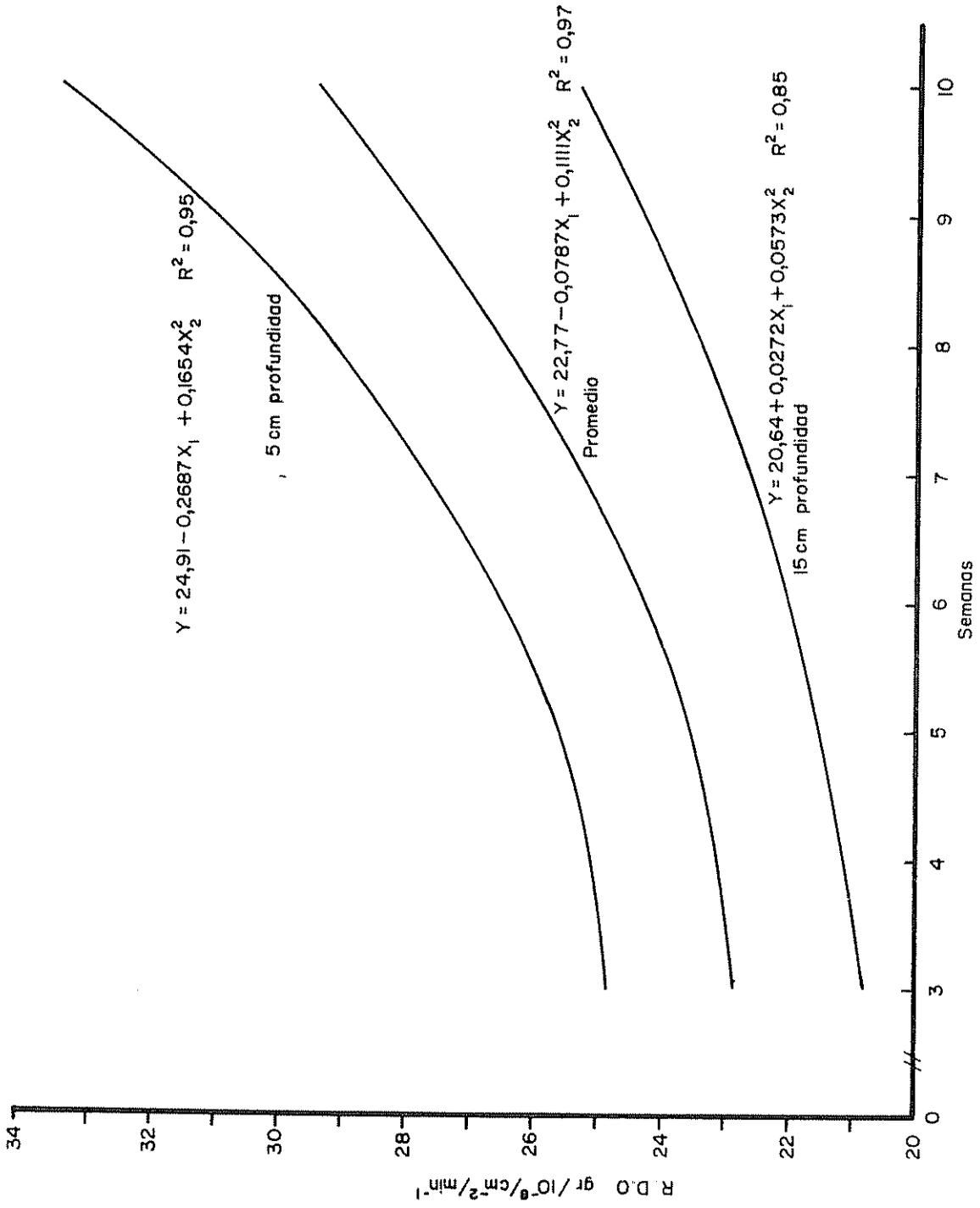


Fig.- 19 Relación entre la rata de difusión de oxígeno y el tiempo en semanas. Las lecturas de R. D.O. se hicieron cuando el cultivo de frijol tenía tres semanas de edad.

#### 4.7. Penetrabilidad y resistencia al corte

El Cuadro 44 muestra como la penetrabilidad, el porcentaje de penetración y la resistencia al corte aumentan desde 0,003 bares hasta 12,80 bares.

#### 4.8. Evaporación, Factor "f" y Factor "R"

La evaporación obtenida en el invernadero presenta valores bastante altos según se puede apreciar en el Cuadro 46 como también se puede observar que los factores que la influyen tienen valores altos como la temperatura, la humedad relativa y las horas de brillo solar diarios (Cuadro 45).

En el Cuadro 48 se muestra como el factor  $f = (ETP/Ev)$  aumenta con la edad de la planta y el factor  $R = (ET/ETP)$  disminuye a medida que en el suelo se incrementa la succión. En el Cuadro 47 están anotados los promedios semanales de consumo de agua del frijol, el cual aumenta con la edad de la planta y disminuye con el incremento de la succión de agua del suelo.

En los Cuadros 49 y 50 se registran las temperaturas medias diarias del suelo de las macetas a 5 y 15 cm de profundidad.