



**V Seminario Latinoamericano de Irrigación**  
**IIII Jornadas Venezolanas de Riego**

Tema III  
Doc. N° 20

CALIDAD DE AGUAS DE RIEGO Y REQUERIMIENTOS DE DRENAJE

Trabajo presentado por:  
Ing. Ildefonso Pla Sentís  
VENEZUELA

FACULTAD DE AGRONOMIA

**instituto de**  
**EDAFOLOGIA**

V SEMINARIO LATINOAMERICANO DE IRRIGACION

III JORNADAS VENEZOLANAS DE RIEGO

20 al 31 de Octubre de 1968

TEMA III

CALIDAD DE AGUAS DE RIEGO Y REQUERIMIENTOS  
DE DRENAJE

Por

Dr. Ildefonso Pla Sentís



UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA

V SEMINARIO LATINOAMERICANO DE IRRIGACION

III JORNADAS VENEZOLANAS DE RIEGO

TEMA III

CALIDAD DE AGUAS DE RIEGO Y REQUERIMIENTOS

DE DRENAJE

Por

Ildefonso Pla Sentís  
Instituto de Edafología  
Facultad de Agronomía  
Universidad Central de Venezuela  
Maracay

## RESUMEN

La acumulación de sodio en el suelo debido a la concentración de la solución del suelo por evapotranspiración acompañada de una precipitación de carbonatos de Ca + Mg, se está esparciendo en los suelos con drenaje reducido, tanto en Venezuela como en muchas otras partes del mundo. Es bien conocido que dicho proceso conduce a una disminución, e incluso a una pérdida completa de la producción agrícola en tierras originalmente fértiles. El principal efecto es la deterioración de las condiciones físicas de los suelos provocadas por las sales de sodio. Por lo tanto es absolutamente necesario llegar a determinar cuáles son los requerimientos de lixiviación y drenaje para las diferentes aguas de riego, especialmente si contienen muchos bicarbonatos, para poder prevenir la acumulación de cantidades excesivas de Na en el suelo. Hasta el presente, las condiciones de lixiviación, representadas por el porcentaje del agua de riego que pasa a través de la zona radicular, hacia zonas inferiores, no habían sido utilizadas para evaluar cuantitativamente la posibilidad de acumulación de sodio en los suelos, especialmente en los casos cuando el agua contiene alta proporción de bicarbonatos.

En este trabajo se presenta y propone el uso de un criterio y sistema, que permite evaluar la calidad de agua de riego, tanto con respecto a peligros de acumulación de sales como de sodio, tomando en cuenta su contenido de bicarbonatos, y las condiciones de drenaje de los suelos a los cuales dicha agua va a ser aplicada.

Por otro lado, el sistema propuesto permite además de predecir la acumulación de sales y sodio, el determinar los requerimientos de lixiviación y drenaje para evitar que los niveles de sales y sodio en el suelo sobrepasen un determinado valor límite cuando se usa una determinada agua de riego, con o sin bicarbonatos. El sistema también puede utilizarse para calcular los requerimientos de enmiendas de Ca para aguas de riego que deben utilizarse bajo ciertas condiciones limitadas de drenaje. Se presentan nomogramas para facilitar el uso práctico del método.

El desarrollo teórico, y los resultados experimentales en los que se basa el sistema, fueron presentados en trabajos previos.

# I N D I C E

	<u>Página</u>
Justificación .....	1
Antecedentes .....	5
Bases Teóricas del Sistema Propuesto .....	9
Apéndice y Figuras .....	16
Conclusiones .....	29
Literatura Citada .....	31
Ponencia .....	33

## JUSTIFICACION

La formación, acarreo, y acumulación de carbonatos y bicarbonatos de los metales alcalinos es uno de los procesos geoquímicos mas antiguos, el cual todavia sigue activo en toda la superficie de la Tierra. La meteorización química de los minerales que contienen Na y K (especialmente feldespatos y feldespatoides) en presencia de agua con ácido carbónico, conduce a la formación de soluciones de carbonatos y bicarbonatos de esos elementos. En general (Kovda, 1965) se ha observado que cuanto menor es el contenido de sales en las aguas naturales, mayor es la cantidad relativa de carbonatos y bicarbonatos disueltos. En condiciones naturales, la constante meteorización de los aluminosilicatos es una fuente continua de carbonatos y bicarbonatos de metales alcalinos, los cuales son acarreados en las aguas superficiales y subterráneas, acumulándose en áreas sin drenaje donde precipitan carbonatos de Ca y Mg, y se forman suelos sódicos y salino-sódicos. Este proceso es más acelerado en zonas con climas áridos o semiáridos.

En zonas tropicales, como Venezuela, las sales solubles en el medio han sido generalmente reducidas a una pequeña cantidad, por procesos de meteorización y lixiviación llevados a cabo por las aguas naturales. En tales condiciones, los productos de meteorización, y las aguas naturales se caracterizan por un bajo contenido en sales, casi todas bicarbonatos, las cuales al entrar en áreas donde se acumulan y evaporan, pueden dar lugar a la formación de suelos sódicos, o salino-sódicos. En áreas de Venezuela donde el riego aún no ha sido introducido, el drenaje natural es generalmente suficiente para controlar ese proceso.

De acuerdo a los sistemas de clasificación usados hasta el presente, la mayoría de las aguas superficiales y subterráneas usadas, o de uso potencial, para riego en Venezuela, son de excelente o buena calidad. Excepto por algunas variaciones estacionales, se puede afirmar que la concentración total de sales, y los valores de "relación de adsorción de sodio" ( $RAS = Na / \sqrt{Ca+Mg/2}$ ) de dichas aguas son muy bajas, y en general el contenido de bicarbonatos es igual o menor que el de cationes divalentes, con lo cual el contenido de "carbonato de sodio residual" ( $HCO_3 - (Ca + Mg)$ ) es cero, o muy bajo. El contenido de sales en las aguas de riego varía de 2,5 a 7,5 meq./litro. El porcentaje de Ca + Mg es generalmente dos a tres veces mayor que el de Na y K, pero el de bicarbonatos es relativamente alto (70 - 90%) comparado con los sulfatos y cloruros. El contenido de elementos tóxicos, como boro, es generalmente inapreciable. Consecuentemente dichas aguas de riego son muy apropiadas para usarlas en agricultura bajo riego, y nunca acarrearían problemas de salinidad y alcalinidad, si en el manejo del riego se cumpliera con satisfacer al mismo tiempo los requerimientos del cultivo, y los requerimientos de lixiviación. Sin embargo, el bajo contenido de sales y cationes divalentes hace que nuestras aguas de riego sean muy inefectivas en el combate contra la alcalinidad de los suelos

En Venezuela, la expansión del riego ha inducido en muchos casos un ascenso en la mesa de agua. Con drenajes inadecuados, la pequeña cantidad de Na en las aguas de riego puede tener un efecto acumulativo en el suelo, a través de los años con riego continuado de la tierra. Los suelos aluviales de muchas de las áreas regadas en Venezuela presentan generalmente una distribución textural, la cual es extremadamente variable en distancias cortas, tanto en dirección horizontal, como vertical.

La fracción arena tiende a estar compuesta de arena fina a muy fina, y la fracción limo tiende a ser abundante. La mayoría de los suelos presentan características físicas muy pobres, con baja conductividad hidráulica, y alta retención de humedad. Los suelos superficiales tienen una tendencia a deformarse y compactarse, lo cual puede atribuirse a su bajo contenido de materia orgánica, y alto contenido de limo. Por ello, con solo 10 - 12% de Na intercambiable, la tasa de infiltración es prácticamente cero, lo cual representa un enorme problema para su recuperación. La incidencia de suelos salino-sódicos, y sódicos es también muy variable, cambiando tanto en forma cualitativa como cuantitativa de un punto a otro, debido a influencias tales como relieve superficial, nivel de agua freática, relieve del subsuelo, uso de la tierra, y prácticas de riego. De cualquier forma, la mayoría de los perfiles de suelo afectados por sales (si no hay influencia de aguas marinas) en Venezuela pueden calificarse como salino-sódicos o sódicos (Pla, 1967, 1968a). Dichos suelos se caracterizan por contenidos bajos de cationes divalentes en solución. Pequeñas cantidades de carbonatos casi insolubles de Ca y Mg son generalmente la única fuente de dichos cationes, ya que la presencia de yeso es rara. Por consiguiente, una gran proporción de esos suelos es difícil de recuperar, lo cual requeriría el uso de enmiendas. Esto hace que la recuperación sea un proceso complicado y costoso. Hoy en día, ya muchos campos regados, cuya producción es decreciente, muestran los efectos de la acumulación de sales y sodio, pero las áreas afectadas son probablemente mucho mayores que lo que puede deducirse a partir de síntomas visibles en el suelo superficial, o en las plantas.

Como conclusión podría decirse que el creciente deterioro de las tierras agrícolas bajo riego en Venezuela se deben a varias razones, entre las cuales pueden incluirse las propiedades físicas desfavorables de los suelos, las condiciones climáticas que favorecen una tasa alta de evaporación, y las pobres condiciones de drenaje. Los primeros dos factores ecológicos no pueden cambiarse apreciablemente. Un drenaje adecuado aún no ha sido considerado en Venezuela como un componente esencial de una práctica racional de riego. En años pasados se han hecho algunas instalaciones de drenaje artificial, las cuales consisten generalmente en canales abiertos poco profundos, cuya función se reduce a remover excesos de agua superficial. Para prevenir el desarrollo de suelos salinos o sódicos, y para su recuperación, se requiere un drenaje interno adecuado. La cantidad de agua aplicada al suelo debe proveer además de la requerida para satisfacer el uso consuntivo del cultivo, un exceso para lixiviación. Los requerimientos de drenaje deben conocerse para decidir si los drenajes naturales son suficientes, y si no, para determinar qué sistema artificial de drenaje es requerido.

En vista de todos esos factores se comprende la importancia que tiene la determinación de los requerimientos de lixiviación y drenaje para las diferentes aguas de riego disponibles, con el fin de prevenir acumulaciones dañinas de sales o sodio en el suelo. Sin embargo, la mayoría de los índices propuestos hasta el presente para evaluar la calidad de aguas de riego en cuanto a sales, sodio, y bicarbonatos, son altamente empíricos, sin aplicación universal a diferentes condiciones de drenaje. La teoría de requerimientos de lixiviación y drenaje indica claramente que la calificación de un agua de riego con respecto a peligros de salinización no dependerá sólo de la composición del agua

en sí, sino de su uso bajo diferentes condiciones de suelo, cultivo, y manejo.

#### ANTECEDENTES

Reeve (1957), definió los requerimientos de drenaje para control de salinidad, como la cantidad de agua de lixiviación que debe ser descargada al sistema en un período de tiempo dado, y la profundidad mínima del agua freática que debe mantenerse en el interin. La cantidad a drenarse debe ser tal que el nivel de sales en el suelo se mantenga por debajo de un determinado límite. Esta cantidad sería el "requerimiento de lixiviación", definido como la fracción del agua de riego que debe ser lixiviada a través de la zona radicular para mantener la salinidad del suelo por debajo de un nivel dado.

Si se conocen los requerimientos de lixiviación y drenaje, aplicando las leyes de movimiento de agua subterránea, formuladas por la teoría de drenaje, se puede calcular la intensidad requerida en las instalaciones de drenaje superficial o subterráneo. Con respecto al uso de la teoría sobre requerimientos de lixiviación en la práctica, se reconoce que existen limitaciones en cuanto a la dificultad de medir el volumen de agua que percola hacia el subsuelo, la posibilidad de precipitación de sales en el mismo suelo, y por el hecho de que la teoría sólo se cumple a largo plazo, y en condiciones de flujo estático. La primera dificultad se resolvería usando el método propuesto por Rose y Stern (1965), para determinar el término de drenaje en la ecuación de balance hidrológico. La posibilidad de precipitación de sales es resuelta con el método propuesto en este trabajo. Los últimos factores no serian importantes, si

se toma en cuenta que al considerar condiciones promedio a largo plazo (lo cual aplica en nuestras condiciones), las variaciones momentáneas en cuanto al almacenaje de humedad y sales en el suelo, la profundidad de la zona radicular, las reacciones de intercambio de cationes, y las condiciones de drenaje, no serian de gran significación, siempre que dichas condiciones de drenaje permitan la lixiviación requerida.

Las ecuaciones desarrolladas por Reeve (1957) dan los requerimientos de riego y drenaje para control de salinidad en base al uso consuntivo y requerimientos de lixiviación, como sigue:

$$\% L = \frac{H_d}{H_r} \times 100 = \frac{C_r}{C_{es}} \times 100 \quad (1)$$

$$H_r = H_{uc} / (1 - \% L/100) \quad (2)$$

$$H_d = H_{uc} \left( \frac{\% L}{100 - \% L} \right) \quad (3)$$

Donde:

$H_r$  = Lámina de riego requerida

$H_d$  = Lámina de agua de lixiviación (drenaje interno)

$H_{uc}$  = Lámina de uso consuntivo

$\% L$  = Lixiviación requerida expresada en  $\%$

$C_r$  = Concentración de sales en el agua de riego

$C_{es}$  = " " " " " extracto de saturación del suelo.

Boumans et al (1963), usando los principios de requerimientos de lixiviación desarrollados por Reeve (1957), introdujeron ciertos refinamientos, y llegaron a las siguientes ecuaciones:

$$H_r = (H_{uc} - H_p) \left( 1 + \frac{C_r}{2f C_{es} - C_r} \right) \quad (4)$$

$$H_d = \frac{1}{2f} \times \frac{C_r}{C_{es}} \times H_r \quad (5)$$

Donde:

$H_p$  = Lámina de lluvia

$f$  = "Coeficiente de eficiencia de lixiviación" cuyo valor oscila entre 0,4 y 0,6, para suelos de textura pesada a media.

Usando la definición de % L (1), dichas ecuaciones pasarían a:

$$H_r = (H_{uc} - H_p) \left( \frac{2f}{2f - \% L/100} \right) \quad (6)$$

$$H_d = \frac{1}{2f} \times \frac{\% L}{100} \times H_r \quad (7)$$

En el caso de que  $f = 0,5$ , estas ecuaciones son similares a las (2) y (3), excepto por la introducción del agua aportada por lluvia ( $H_p$ ).

Las ecuaciones precedentes han sido usadas por los mismos autores (Boumans et al, 1963), para calcular la cantidad de agua que debe descargar el sistema de drenaje durante un determinado período de tiempo, de tal manera que el contenido de sales en la zona radicular

se mantenga por debajo de determinado nivel. Cuando la evapotranspiración y la lluvia presentan variaciones durante los meses del año, los valores requeridos de  $H_r$  y  $H_d$  también variarán de mes a mes, si es que se desea mantener un nivel constante de salinidad en el suelo. Los mismos autores presentan ejemplos de cómo calcular  $H_r$  y  $H_d$  mes por mes, para suelos regados continua o estacionalmente, cuando se requieran de acuerdo a las circunstancias valores constantes de  $C_{es}$ ,  $H_r$ , o  $H_d$ .

En los casos anteriormente citados el % L no prevé la precipitación de sales en el suelo, ni las posibilidades de acumulación dañina de Na previo a la salinización, ya que el sistema fué desarrollado para aguas de riego con alto contenido de sales, y baja proporción de bicarbonatos. Desde hace tiempo (U.S. Salinity Lab. Staff, 1954) se ha considerado que las posibilidades de lixiviación tienen también influencia sobre la acumulación de Na en los suelos, ya que la concentración de la solución del suelo provocará a su vez un cambio en la "relación de adsorción de sodio" (RAS) original del agua de riego. Este efecto es especialmente marcado cuando la concentración de la solución del suelo va acompañada de precipitaciones de carbonatos de Ca y Mg (Wilcox, 1954), (Bower y Wilcox, 1965), lo cual suele ocurrir cuando se usan para riego agua con alto contenido de bicarbonatos. Sin embargo, salvo apreciaciones muy generales, cualitativas, y empíricas, acerca de la influencia de la lixiviación sobre la posibilidad de acumulación de Na en los suelos a partir de las aguas de riego, no se había intentado hasta ahora usar la teoría de lixiviación para predecir dicha acumulación. El sistema aquí propuesto es el resultado de estudios

previos (Pla, 1967, 1968a, 1968b), los cuales condujeron a una teoría para calcular y predecir:

- a) Acumulación de sales y sodio cuando se usan aguas de riego con o sin bicarbonatos.
- b) Requerimientos de lixiviación para prevenir la acumulación excesiva de sales o sodio en suelos regados con un agua determinada.
- c) Requerimientos de enmiendas de Ca para aguas de riego usadas en suelos con limitadas posibilidades de lixiviación.

La teoría fué sometida a prueba en experimentos controlados de laboratorio e invernadero (lisímetros), complementados con observaciones de campo.

#### BASES TEORICAS DEL SISTEMA PROPUESTO.-

Para poder usar la teoría de "requerimientos de lixiviación" para predecir la acumulación de Na en el suelo, ella debe aplicarse independientemente a los iones Na, y Ca + Mg presentes en el agua de riego, ya que en esa forma se podrá predecir el valor de RAS en la solución equilibrio del suelo. Allison (1963), basándose en los resultados de determinaciones en muestras de suelo de todo el mundo, indica que el valor de RAS en el extracto de saturación puede ser usado como índice bastante preciso de la acumulación de Na intercambiable. Análisis estadísticos del U.S. Salinity Lab. Staff (1954), y nuestra propia experiencia con muchas muestras de suelo del país, indican que los valores de RAS, y de "porcentaje de sodio intercambiable", son aproximadamente iguales en el rango de 5 - 30, que es

el que más nos interesa. Por lo tanto pueden establecerse valores límites de RAS, dependiendo del suelo, cultivo, etc., en la misma forma que se ha hecho hasta ahora para salinidad total.

Para sales muy solubles, las cuales precipitan en el suelo solamente cuando se hayan alcanzado concentraciones demasiado altas para el crecimiento vegetal, las ecuaciones propuestas anteriormente pueden usarse sin modificación. Entre esas sales se incluirían todas las de Na y K, todos los cloruros, todos los sulfatos no ligados al Ca, y aún en muchos casos los sulfatos de Ca. Las complicaciones se presentan cuando hay sales que pueden precipitar en el suelo, lo cual ocurriría principalmente cuando las aguas de riego contengan cantidades considerables de Ca y Mg en combinación con bicarbonatos y sulfatos, debido a que la concentración de dichas sales no puede sobrepasar la de sus soluciones saturadas. En este caso el problema se solucionó introduciendo las máximas concentraciones posibles de dichas sales en condiciones que prevalezcan en el suelo, en combinación con la teoría de lixiviación. Este procedimiento nos permite al mismo tiempo un uso más preciso de la teoría de lixiviación para predecir acumulaciones de sales totales, ya que toma en consideración las posibilidades de precipitación en el suelo.

En base al desarrollo expuesto en otros trabajos (Pla, 1967, 1968a, 1968b), se llegó a las siguientes ecuaciones para calcular las concentraciones de Ca + Mg y Na en la solución de suelo en equilibrio con un determinado % L.

$$Na_s = Na_r \times 100/\%L \quad (8)$$

$$Ca_s = (Ca AS_r) \times 100/\%L + (Ca B_s) \quad (9)$$

Donde:

$(Ca AS_r)$  = Ca + Mg asociado con aniones que no sean bicarbonatos.

$$(Ca AS_r) = Ca_r - B_r \quad (\text{para aguas con } B_r < Ca_r)$$

$$(Ca AS_r) = 0 \quad (\text{para aguas con } B_r \geq Ca_r).$$

$B_r$  = Bicarbonatos en el agua de riego.

$Ca B_s$  = Bicarbonatos de Ca + Mg en la solución del suelo.

$Ca B_s \approx 10 \text{ meq./l.}$  (para aguas donde  $Ca_r \gg B_r$  y  $Ca B_r \times 100/\%L \geq 10$ ).

$Ca B_s \approx Ca B_r \times 100/\%L$  (para aguas donde  $Ca_r \gg B_r$  y  $Ca B_r \times 100/\%L < 10$ , y cuando no hay presencia de carbonatos de Ca + Mg precipitados en el suelo).

$Ca B_s \approx Ca B_r$  (para aguas donde  $Ca_r < B_r$ )

$Ca B_r \approx$  Bicarbonatos de Ca + Mg en el agua de riego.

Los valores máximos de  $Ca B_s$  fueron seleccionados en base a numerosas mediciones en soluciones de suelo obtenidas directamente en condiciones de laboratorio, invernadero y campo, apoyadas por un desarrollo teórico (Pla, 1968a).

Con las ecuaciones (8) y (9) se pueden predecir los valores de RAS, y de concentración total de sales ( $C_s$ ) que se van a alcanzar en la solución del suelo en equilibrio con un determinado %L.

$$\text{RAS} = \text{Na}_s / \sqrt{\text{Ca}_s / 2} \quad (10)$$

$$\text{C}_s = \text{Na}_s + \text{Ca}_s \quad (11)$$

A partir de las ecuaciones (8), (9) y (10), se llega a:

$$\%L = \frac{50 (\sqrt{(\text{Ca AS}_r)^2 + 8 (\text{Na}_r)^2 (\text{Ca B}_s) / (\text{RAS})^2} - (\text{Ca AS}_r))}{(\text{Ca B}_s)} \quad (12)$$

Donde: %L resulta ser la lixiviación requerida, expresada en % del agua de riego aplicada, para prevenir el desarrollo de un valor de RAS mayor del que se considere crítico para el uso práctico del suelo. Dicho valor crítico de RAS es el que irá en la ecuación. Todos los otros valores vienen dados en meq./l.

A partir de las ecuaciones (8), (9), y (11) se llega a:

$$\%L = \frac{(\text{Ca AS}_r) + \text{Na}_r}{\text{C}_s - (\text{Ca B}_s)} \times 100 \quad (13)$$

donde % L, sería el requerimiento de lixiviación para evitar que la concentración total de sales en el extracto de saturación sobrepase un determinado valor ( $\text{C}_s$ ) considerado crítico para unas condiciones determinadas.

Después de calcular ambos requerimientos de lixiviación (%L), se escogería el mayor de ellos.

Los nomogramas de las figuras 1, 2, 3, y 4, fueron trazados calculando con la ecuación (12), los %L requeridos para aguas de riego con concentraciones totales de sales ( $\text{C}_r$ ) de 2.5, 5.0, 7.5, y 10.0 meq./l., y diferentes proporciones de Na, ( $\text{Na}_r$ ), y bicarbonatos ( $\text{B}_r$ ),

usando 10 como valor límite de RAS. Este valor es el que de acuerdo a nuestra experiencia correspondería a la mayoría de los suelos no salinos de la serie Maracay.

Aplicando la ecuación (13), y usando 40 meq./l., como valor límite de  $C_s$  (límite de salinidad que corresponde aproximadamente a  $CE = 4$  mmhos), se calcularon los %L para cada combinación de  $C_r$ ,  $B_r$ , y  $Na_r$ , y con ellos se trazó la línea que separa el área sombreada en cada uno de los nomogramas. Cualquier combinación de %L,  $B_r$  y  $Na_r$  que concorra en dicha área conduciría a un valor equilibrio de  $C_s$  superior a 40 meq./l.

En ciertos casos, cuando la baja conductividad hidráulica del suelo, o el alto costo de las instalaciones de drenaje hace impracticable el cumplir con los requerimientos de lixiviación para control de Na calculados con la ecuación (12), una solución práctica podría ser agregar enmiendas de Ca (generalmente en forma de yeso) a las aguas de riego, con el fin de reducir esos requisitos. Esta práctica sería especialmente beneficiosa en caso de aguas de riego con baja concentración de sales, ya que en esas circunstancias la enmienda serviría no sólo para reducir los %L requeridos, sino que contribuiría a un incremento en la conductividad hidráulica natural del suelo, al aumentar la concentración total de sales en la solución percolante.

Usando las ecuaciones (8), y (10), e introduciendo:

$$(Ca \text{ AS en el agua enmendada}) = (Ca \text{ AS}_r) + (Ca \text{ AS}_R)$$

$$(Ca \text{ AS}_R) = Ca_R = \text{enmienda de Ca añadida.}$$

se llega a:

$$Ca_R = Na_r + B_r + \frac{200 (Na_r)^2}{(RAS)^2 \%L} - (Ca B_s \frac{\%L}{100} + C_r) \quad (14)$$

donde  $Ca_R$  sería el requerimiento de enmienda de Ca (meq./l.) para un agua de riego con determinados valores de concentración total de sales ( $C_r$ ), de Na ( $Na_r$ ), y de bicarbonatos ( $B_r$ ), la cual va a ser usada con una lixiviación limitada ( $\%L$ ), con el fin de mantener el valor de RAS en la solución del suelo por debajo de un valor preseleccionado.

Los nomogramas de las figuras 5, 6, 7, y 8 fueron trazados con los valores de  $Ca_R$  calculados para aguas de riego con concentraciones totales de sales ( $C_r$ ) de 2,5; 5,0; 7,5; y 10,0 meq./l., con diferentes proporciones de  $Na_r$  y  $B_r$ , cuando los valores de  $\%L$  son 5, 10, 15, 20, y 25. Igual que antes, el valor limite de RAS escogido fué 10,0. Debido a que en la ecuación (14) hay cuatro variables ( $Ca_R$ ,  $Na_r$ ,  $B_r$ ,  $\%L$ ), para poder obtener gráficos bidimensionales, dicha ecuación fué reorganizada, quedando como:

$$Ca_R - B_r = Na_r + \frac{200 (Na_r)^2}{(RAS)^2 \%L} - (Ca B_s \frac{\%L}{100} + C_r) \quad (15)$$

Si se calcula el valor de  $C_s$  para el agua ya enmendada, usando la ecuación (11), y se resuelve la ecuación para  $\%L$ , se llega a:

$$\%L = \frac{50 Na_r (1 + \sqrt{1 + 8 C_s / (RAS)^2})}{C_s} \quad (16)$$

donde  $\%L$  sería el mínimo requerimiento de lixiviación cuando a un agua de riego con determinado  $Na_r$ , se agrega la enmienda requerida ( $Ca_R$ ), para mantener el RAS y  $C_s$  por debajo de los valores limitantes preseleccionados. Si el  $\%L$  calculado con la ecuación (16) es práctico para un determinado suelo y condiciones de drenaje, dicho  $\%L$  sería el usado en la ecuación (15) para calcular  $Ca_R$ . Tomando 40 meq./l. y 10 como valores límites de  $C_s$  y RAS respectivamente, y calculando los  $\%L$  con la ecuación (16), se separó el área sombreada de las figuras 5, 6, 7, y 8, sobre la cual, cualquier combinación de  $Ca_R - B_r$  y  $\%L$  conduciría a valores de  $C_s$  superiores a 40 meq./l.

## APENDICE

Para ilustrar el uso de las ecuaciones y nomogramas, se presentan a continuación varios ejemplos:

Ejemplo 1. Supongamos que se quieran determinar los requerimientos de lixiviación para valores límites de RAS = 10 y  $C_s = 40$  meq./l., cuando se va a usar un agua de riego con la siguiente composición:

$$\text{Ca} + \text{Mg} = 3,0 \text{ meq./l.}$$

$$\text{Na} = 2,0 \quad " \quad "$$

$$\text{HCO}_3 = 2,5 \quad " \quad "$$

$$\text{Cl} = 1,5 \quad " \quad "$$

$$\text{SO}_4 = 1,0 \quad " \quad "$$

En este caso:

$$C_r = \text{Ca} + \text{Mg} + \text{Na} = 5$$

$$\text{Na}_r = 2, \text{ o sea } 40\%$$

$$\text{B}_r = 2,5, \text{ o sea } 50\%$$

En el nomograma de la figura 2, la línea horizontal trazada desde  $\text{B}_r = 50\%$ , intersecta la línea de 40%  $\text{Na}_r$  en un punto, el cual al ser proyectado perpendicularmente sobre la escala inferior nos da un  $\%L = 6,5$ . Como el intersección ocurre en el área sombreada, dicho  $\%L$  a pesar de que impediría que la RAS de la solución del suelo pasara de 10, permitiría que  $C_s$  pasara de 40 meq./l. Para evitar esto, se hallaría otro  $\%L$ , prolongando la línea horizontal trazada desde el 50%  $\text{B}_r$

hasta el límite del área sombreada, y proyectando el punto de intersección sobre la escala de %L. Con ello obtenemos un %L = 8,3.

Ejemplo 2. Si teniendo a la disposición el agua de riego del ejemplo 1, se quisiera calcular el %L requerido con valores límites de 2,0 y 60 meq./l. para RAS, y  $C_s$  respectivamente, se pueden usar las ecuaciones (12) y (13), con los siguientes datos:

$$(Ca AS_r) = Ca_r - B_r = 3 - 2.5 = 0.5$$

$Ca B_s = 10$  (si al calcular %L resulta que

$$Ca B_r \times \frac{100}{\%L} \geq 10)$$

$$RAS = 20$$

$$C_s = 60$$

Los valores de %L calculados en esa forma son:

$$\%L \text{ (para } RAS \leq 20) = 2,6$$

$$\%L \text{ (para } C_s \leq 60 \text{ meq./l.)} = 5,0$$

Con lo cual se escogería %L = 5,0, para poder controlar tanto RAS como  $C_s$ , por debajo de los límites especificados.

Ejemplo 3. Se quiere determinar los requerimientos de lixiviación para valores límites de RAS = 10, y  $C_s = 40$  meq./l., cuando se usa un agua de riego con la siguiente composición:

$$\text{Ca} + \text{Mg} = \text{Ca}_r = 1,6 \text{ meq./l.}$$

$$\text{Na}_r = 2,4 \quad " \quad " \quad (60\%)$$

$$\text{HCO}_3 = \text{B}_r = 2,5 \quad " \quad " \quad (62,5\%)$$

$$\text{Cl} = 0,5 \quad " \quad "$$

$$\text{SO}_4 = 1,0 \quad " \quad "$$

En este caso,  $C_r = \text{Ca}_r + \text{Na}_r = 4,0 \text{ meq./l.}$

Como no existe un nomograma para ese valor de  $C_r$ , se pueden obtener valores para  $C_r = 2,5$ , y  $C_r = 5,0$ , interpolando entre ellos posteriormente. Procediendo como en el ejemplo 1, encontramos.

$$\text{Para } C_r = 2,5 \quad ; \quad \%L = 21,5$$

$$\text{Para } C_r = 5,0 \quad ; \quad \%L = 30,0$$

En ambos casos la intersección cae fuera del área rayada, lo cual indica que los requerimientos de lixiviación para el control de Na son más que suficientes para controlar la salinidad.

Interpolando para  $C_r = 4,0$ :

$$\%L = 21,5 + \left( \frac{30,0 - 21,5}{5,0 - 2,5} \right) (4,0 - 2,5) = 26,6$$

También se pudiera haber usado directamente la ecuación (12), con valores de  $(\text{Ca AS}_r) = 0$ ,  $(\text{B}_r \geq \text{Ca}_r)$  y  $\text{Ca B}_s = \text{Ca}_r (\text{B}_r \geq \text{Ca}_r)$ , llegándose a:

$$\%L = 26,8$$

Ejemplo 4. Supongamos que por razones prácticas, usando el agua del ejemplo 3, no se puede llegar a 26,8 %L, sino solamente hasta 10 %L. En este caso, se puede determinar el requerimiento de enmienda de Ca ( $Ca_R$ ), usando la ecuación (14), con valores de %L = 10, y de RAS = 10, llegando a:

$$Ca_R = 1,05 \text{ meq./l.} \approx 90 \text{ gm. de yeso por m}^3 \text{ de agua.}$$

Aplicando la ecuación (16), obtenemos un %L = 9,15 (inferior a 10), lo cual indica que con el agua enmendada, y 10%L, no se sobrepasará el límite de  $C_S = 40 \text{ meq./l.}$

Ejemplo 5. Si se quieren determinar los requerimientos de Ca ( $Ca_R$ ) del agua de riego cuya composición es:

$$\begin{aligned} Ca + Mg &= Ca_r = 3,0 \text{ meq./l.} \\ Na_r &= 2,0 \text{ " " } \\ HCO_3 &= B_r = 3,2 \text{ " " } \\ Cl &= 0,8 \text{ " " } \\ SO_4 &= 1,0 \text{ " " } \end{aligned}$$

si por razones prácticas no se puede obtener un %L superior al 5%, y no se quieren sobrepasar valores de RAS = 10, y de  $C_S = 40 \text{ meq./l.}$

En este caso,  $C_r = 5,0 \text{ meq./l.}$

En la figura 6, partiendo de 2,0 ( $Na_r$ ) en la escala inferior, se busca la proyección vertical sobre la línea 5%L, y desde ese punto de intersección se traza una línea horizontal hasta la escala  $Ca_R - B_r$ , donde se encuentra el valor - 1,9.

Por lo tanto:

$$Ca_R - B_r = 1,9$$

$$Ca_R = B_r - 1,9 = 3,2 - 1,9 = 1,3 \text{ meq./l}$$

o 112 gm. de yeso por  $m^3$  de agua.

Ya que la intersección de  $Na_r = 2,0$  con la línea 5%L ocurre en el área sombreada, esto indica que usando el agua enmendada con ese %L, se llegaría a  $C_s > 40$  meq./l. Para evitar esto, se toma como %L, el que resultaría por interpolación entre las líneas de 5%L y 10%L, en el punto en que la proyección vertical desde  $Na_r$ , cruza la línea de separación del área sombreada. Eso corresponde a un %L = 7,6, con lo cual se alcanzaría un valor  $Ca_R - B_r = - 2,7$ .

$$Ca_R = 3,2 - 2,7 = 0,5 \text{ meq./l. } \approx 43 \text{ gm. de yeso por } m^3 \text{ de agua.}$$

La conclusión es de que en este caso habría que buscar la manera de aumentar las posibilidades de lixiviación hasta un 7,6%, ya que con un 5%L necesariamente se sobrepasaría uno de los valores límites especificados de RAS o  $C_s$ . En cualquier caso, la escogencia de cualquier combinación de %L, y  $Ca_R$ , dependería de la practicabilidad o economía de cada una de ellas.

Una vez calculados los %L requeridos, y conociendo aproximadamente el uso consuntivo y precipitación durante los diferentes meses del año, se puede aplicar el método de Boumans et al (1963), para calcular los requerimientos de riego y drenaje en cada período, y luego, aplicando la teoría de drenaje, calcular las instalaciones de drenaje requeridas.

$C_r = 2.5 \text{ meq. / l.}$

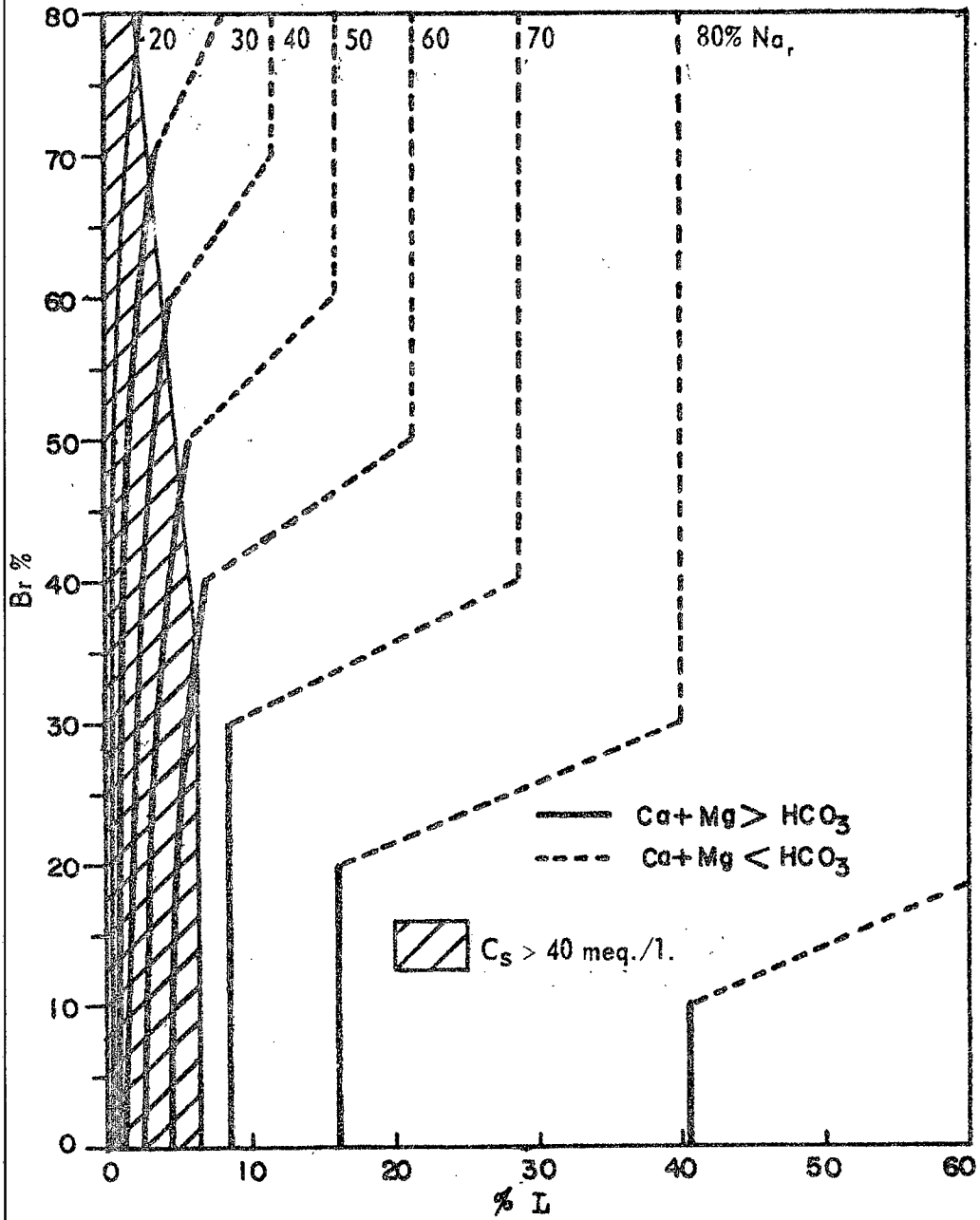


Figura 1

Cr = 5.0 meq. / l.

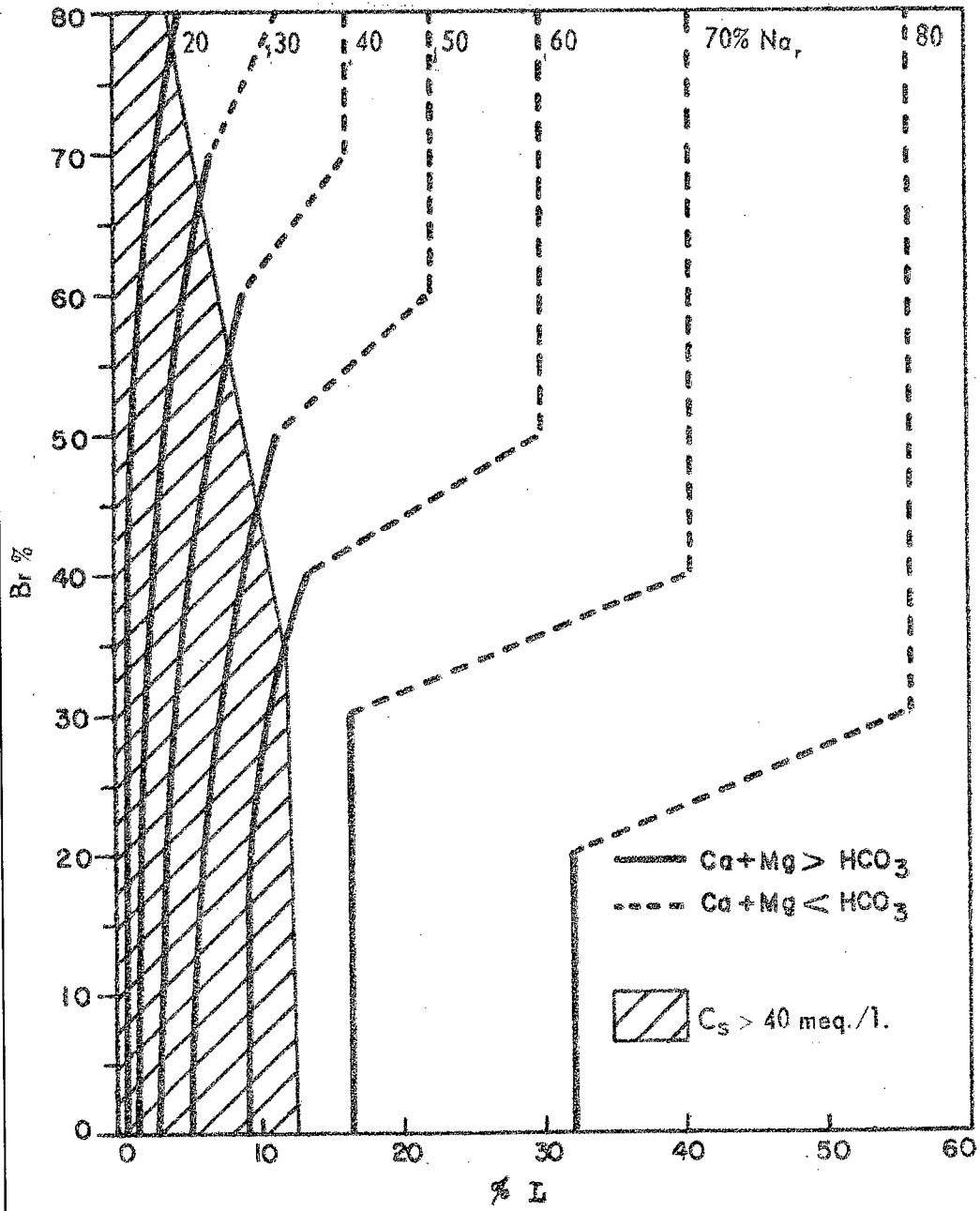


Figura 2

Cr = 7.5 meq. / l.

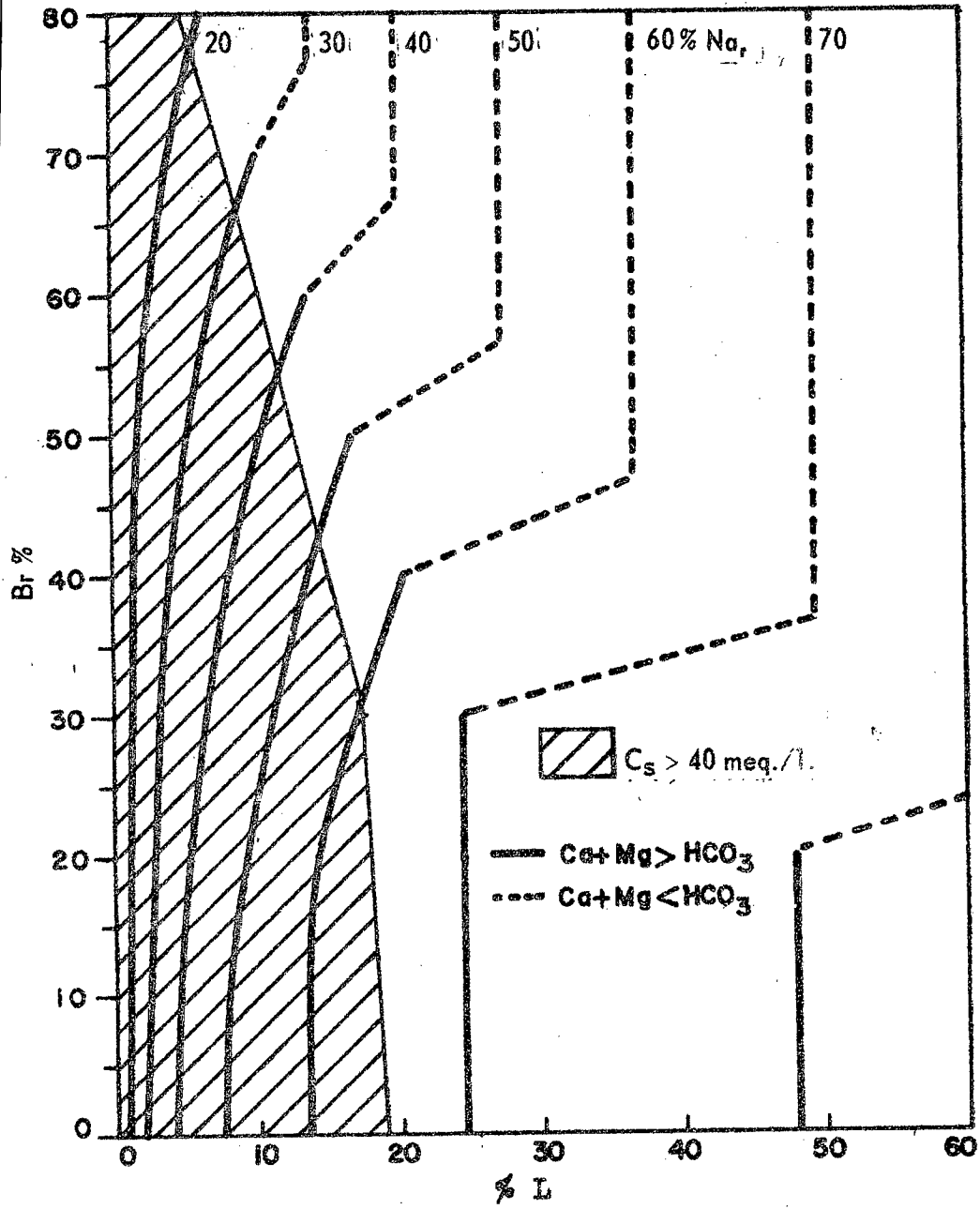


Figura 3

$C_r = 10 \text{ meq./l.}$

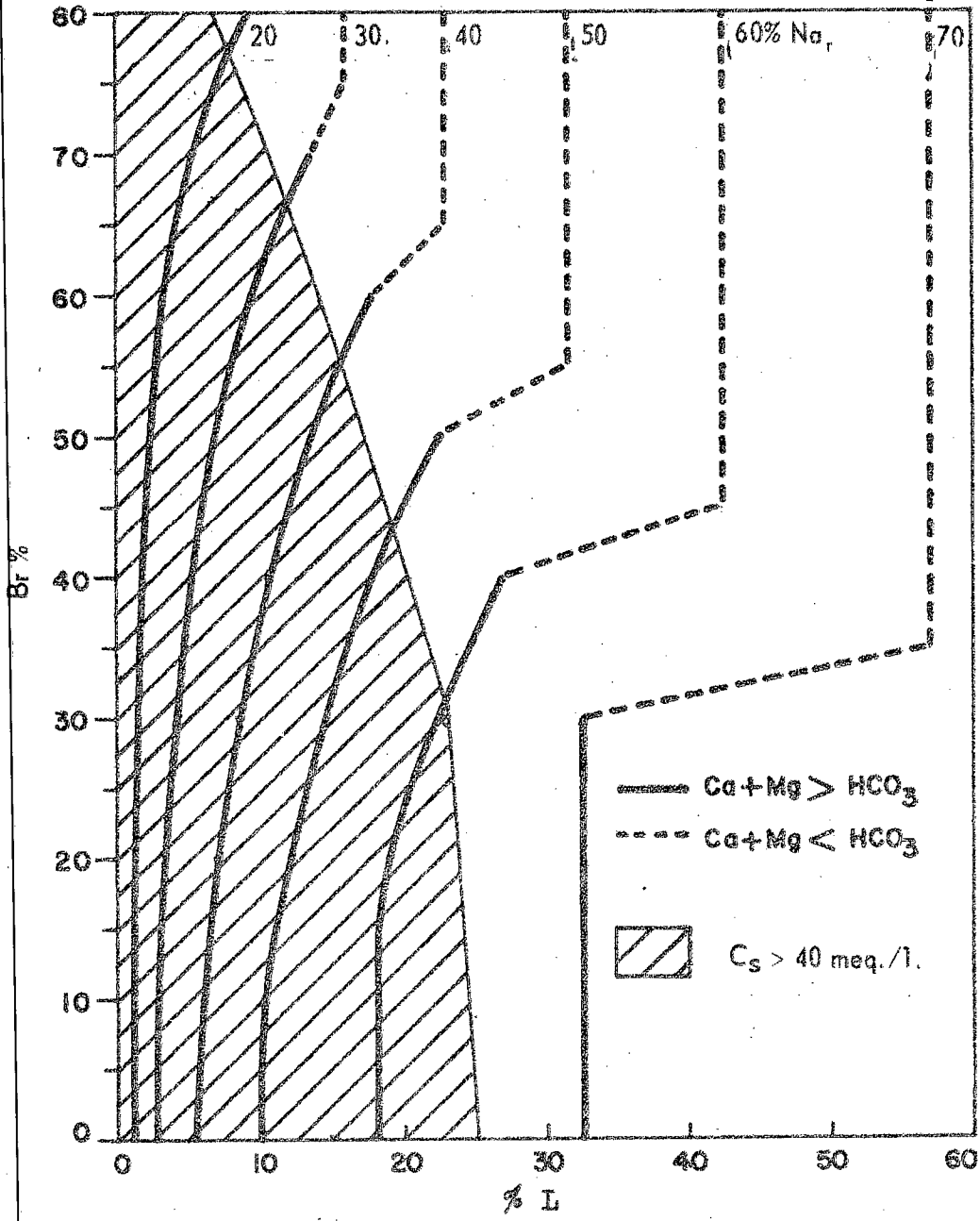


Figura 4

$C_T = 2.5 \text{ meq./l.}$

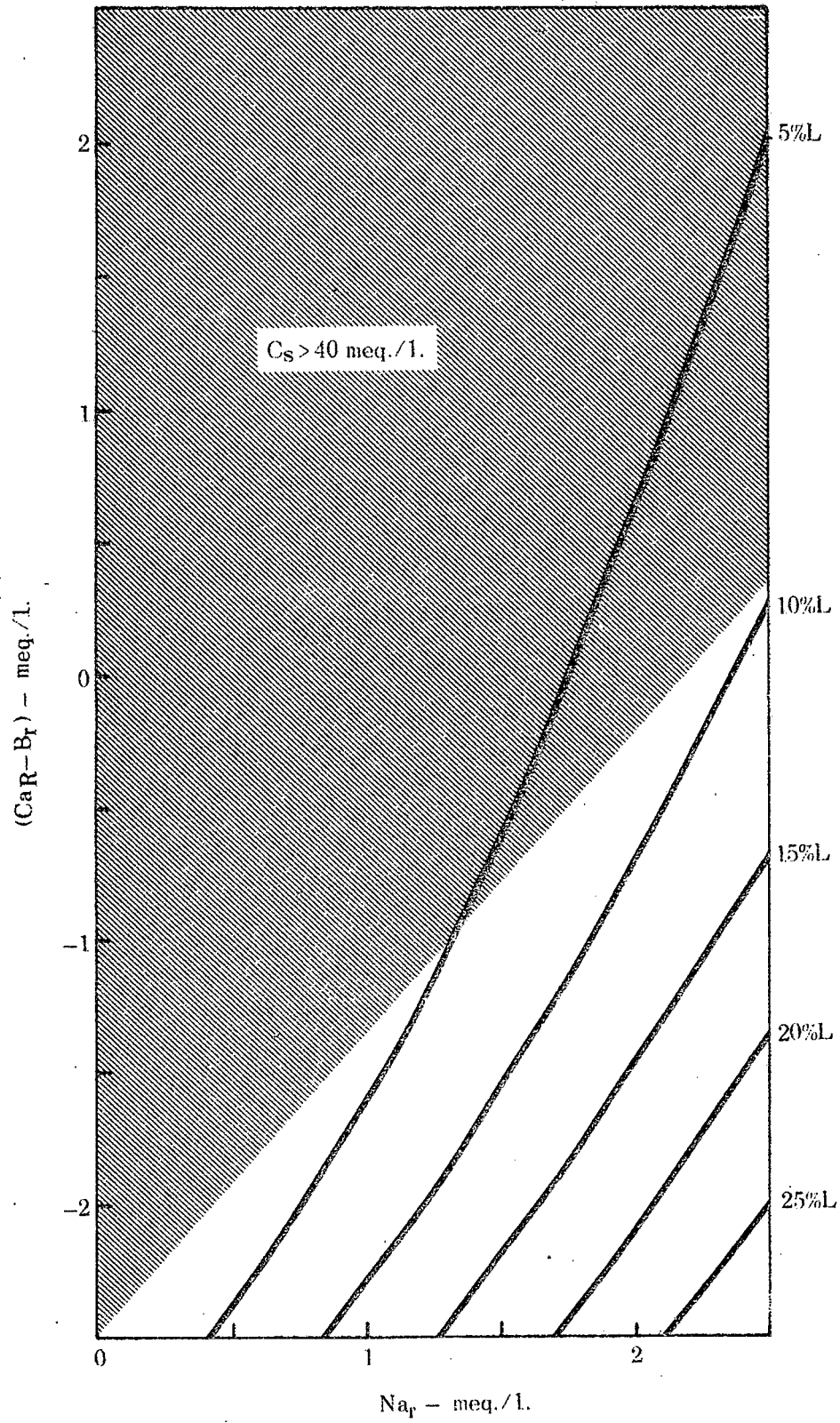


Figura 5

$C_T = 5.0 \text{ meq./l.}$

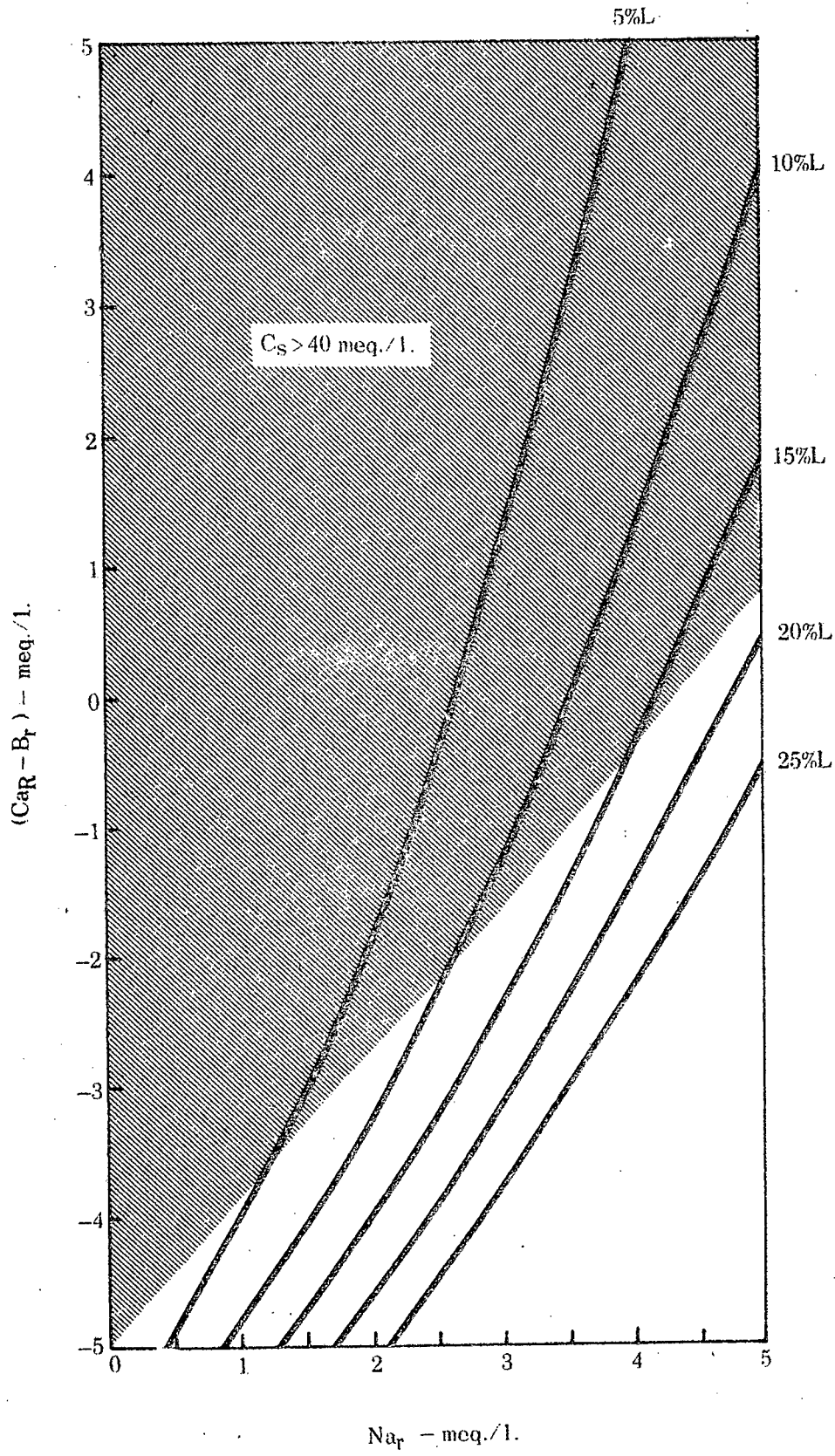
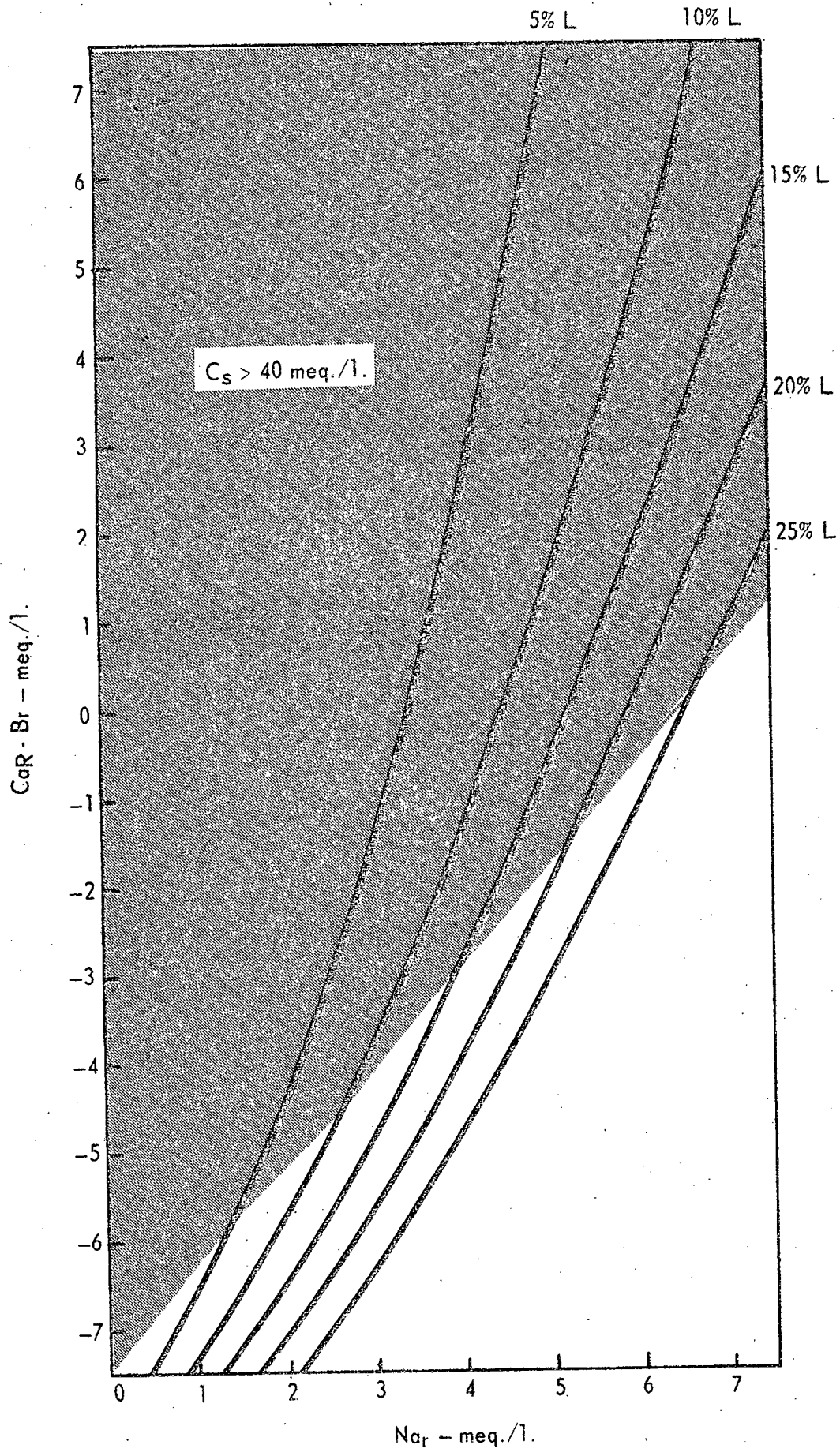


Figura 6

$C_r = 7.5 \text{ meq./l.}$



$C_r = 10 \text{ meq./l.}$

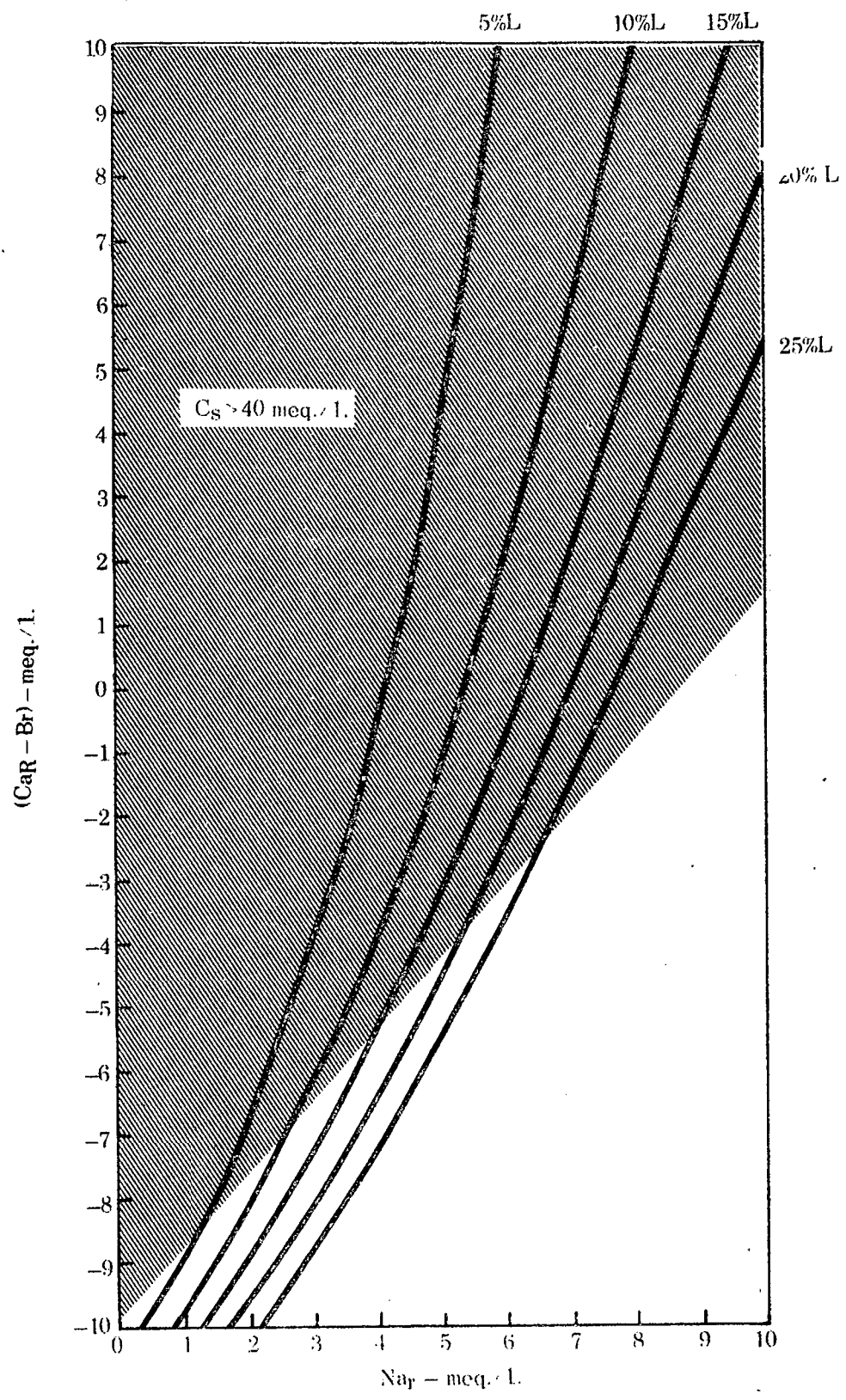


Figura 3

## CONCLUSIONES

- a) En Venezuela una gran mayoría de las aguas usadas, o de uso potencial para riego contienen una alta proporción de bicarbonatos. Al mismo tiempo, gran parte de los suelos usados para riego presentan deficiencias en su drenaje interno natural.
- b) La experiencia indica que en dichas condiciones, los sistemas hasta ahora usados para clasificar aguas de riego, no funcionan. Esto es debido a la no consideración en forma cuantitativa de las posibilidades de precipitación de carbonatos, y de las condiciones de drenaje bajo las cuales esas aguas van a ser usadas.
- c) El sistema aquí propuesto toma en consideración esos factores, es teóricamente correcto, y conduce a evaluaciones cuantitativas. Resultados experimentales obtenidos por el autor, y contenidos en publicaciones previas, probaron su validez.  
En contraste a sistemas previos, permite evaluar al mismo tiempo la calidad de agua de riego con respecto a salinidad total, sodio, y bicarbonatos, tomando en cuenta las posibilidades de drenaje interno del suelo, y estableciendo los requerimientos mínimos de lixiviación tanto para control de sales como de sodio. Tiene la suficiente flexibilidad como para adaptarse a diferentes valores límites de sales y sodio de acuerdo a cultivos y suelos. Sirve además para determinar las enmiendas de Ca requeridos cuando por diversas razones no pueda obtenerse la lixiviación requerida.
- d) Bajo condiciones de campo deben esperarse ciertas desviaciones con respecto a los efectos predichos, debido a la influencia de ciertos factores, cuya enorme variabilidad hace imposible que sean incluidos en el sistema.

Sin embargo, en muchos casos el efecto de unos contrasta el de otros, y en general no debe esperarse que conduzcan a errores apreciables.

- e) Finalmente se concluye que el uso de dicho sistema puede ser muy útil para una determinación general de los requerimientos de riego y drenaje de un área que va a ser regada con un agua determinada. Para ello, además de los requerimientos de lixiviación, deben tomarse en cuenta la contribución del agua de lluvia o subterránea, y el uso consuntivo de los cultivos en el área.

La combinación de requerimientos de lixiviación, y enmienda de Ca a ser seleccionada, dependerá de consideraciones prácticas y económicas.

## LITERATURA CITADA

- ALLISON, L.E. Salinity in relation to irrigation.  
Advan. Agron. 16:139-180. 1964.
- BOUMANS, K.L., R.M. CARLSON, R.K. SCHULTZ, y P.M. van der SLUIS. Reclamation of salt affected soils in Iraq. Soil hydrological and agricultural studies. International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, Holanda, Publ. 11. 175p. 1963.
- BOWER, C.A. y L.V. WILCOX. Precipitation and solution of calcium carbonate in irrigation operations. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 29:93-94. 1965.
- KOVDA, V.A. Alkaline soda-saline soils. Proc. of the Symposium on Sodic Soils. Budapest, Hungría. 15-48. 1965.
- PLA, I. Evaluación cuantitativa de los efectos de los bicarbonatos en el agua de riego sobre las propiedades químicas y físicas de los suelos y factores que influyen sobre la magnitud de tales efectos. Rev. Fac. Agron., Maracay, Venezuela. Alcance 12. 88p. 1967.
- \_\_\_\_\_. Effects of bicarbonates in irrigation waters on soil chemical and physical properties as influenced by leaching and irrigation management. Tesis Ph.D. no publicada, Dept. of Soils and Plant Nutrition, Univ. of Calif. Riverside. 140p. 1968a.

- \_\_\_\_\_. Evaluation of the quality of irrigation waters with high bicarbonate content in relation to the drainage conditions. Trans. 9th Congr. Int. Soil Sci. Soc., Adelaide, Australia. Vol. I:357-370. 1968b.
- REEVE, R.C. The relation of salinity to irrigation and drainage requirements. Trans. 3rd Congr. Int. Comm. Irrigation Drainage, San Francisco. 10.175-10.187. 1957.
- ROSE, C.W. y W.R. STERN. The drainage component of the water balance equation. Aust. J. Soil Res. 3:95-100. 1965.
- U.S. SALINITY LAB. STAFF. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. U.S. Dept. Agric. Handb 60. Washington, D.C. 160p. 1954.
- WILCOX, L.V., G.V. BLAIR, y C.A. BOWER. Effect of bicarbonate on suitability of water for irrigation. Soil Sci. 77:259-266. 1954.

## PONENCIA

## CONSIDERANDO

- 1) Que en Venezuela, los principales problemas de manejo de suelos en los sistemas de riego son los derivados de deficiencias naturales en su drenaje interno, y la no existencia de drenajes artificiales que suplan dicha deficiencia.
- 2) Que la gran mayoría de las aguas de riego disponibles tienen una concentración de sales y sodio, pero alta proporción de bicarbonatos.
- 3) Que de acuerdo a los sistemas tradicionales de clasificación de aguas de riego, dichas aguas nunca ocasionarían problemas de salinidad o alcalinidad, aunque la experiencia en Venezuela y en muchas otras zonas en el mundo indican lo contrario.
- 4) Que debido a lo costoso de la instalación de drenajes internos se requiere conocer con la mayor precisión posible cuales son sus requerimientos mínimos.
- 5) Que en contraste con sistemas previos, el aquí propuesto permite evaluar al mismo tiempo la calidad de agua de riego con respecto a salinidad total, sodio, y bicarbonatos, tomando en consideración las posibilidades de drenaje interno del suelo, y estableciendo los requerimientos mínimos de lixiviación tanto para control de sales como de sodio.
- 6) Que este sistema tiene la suficiente flexibilidad como para adaptarse a diferentes valores límites de sales y sodio de acuerdo a cultivos y suelos, sirviendo además para calcular las enmiendas requeridas

cuando hay dificultades prácticas para cumplir con los requerimientos de lixiviación determinados en base a la composición original de las aguas.

#### SE RECOMIENDA

- 1) Que de aquí en adelante se utiliza el criterio y sistema aquí propuestos para evaluar la calidad de aguas de riego y establecer los requerimientos de drenaje interno en el planeamiento de sistemas de riego.
- 2) Que los requerimientos de drenaje interno así calculados sean tomados en consideración por los organismos responsables para la selección de tierras para riego, para la planificación de los drenajes a nivel de sistemas de riego y a nivel de finca, así como para las recomendaciones de prácticas de riego.
- 3) Que se estimulen en el país los estudios básicos necesarios para:
  - a) Determinar las posibilidades naturales de drenaje interno de los suelos.
  - b) Determinar valores límites de sales y sodio permisibles para diferentes suelos y cultivos.
  - c) Determinar la eficiencia y economía de diferentes prácticas de manejo, enmiendas del agua de riego, y sistemas artificiales de drenaje interno, para poder llegar a establecer en cada caso el método más práctico y económico para cumplir con los requerimientos de drenaje interno, calculados con el método que se recomienda.

En los estudios aquí propuestos, puede colaborar en forma activa el Instituto de Edafología de la Facultad de Agronomía - U.C.V.