

**Determinación de la composición de la fase
soluble del suelo y su impacto en la
producción de caña de azúcar (*Saccharum
Officinarum*), Valle de Santa Ranas,
Honduras, C.A**

Junior Ronaldo Barrios Botzoc

Zamorano, Honduras

Noviembre, 2012

ZAMORANO
DEPARTAMENTO DE CIENCIA Y PRODUCCIÓN AGROPECUARIA.

**Determinación de la composición de la fase
soluble del suelo y su impacto en la
producción de caña de azúcar (*Saccharum
Officinarum*), Valle de Canta Ranas,
Honduras, C.A**

Proyecto especial de graduación presentado como requisito parcial
para optar al título de Ingeniero Agrónomo en el
Grado Académico de Licenciatura

Presentado por

Junior Ronaldo Barrios Botzoc.

Zamorano, Honduras

Noviembre, 2012

Determinación de la composición de la fase soluble del suelo y su impacto en la producción de caña de azúcar (*Saccharum Officinarum*), Valle de Canta Ranas, Honduras, C.A

Presentado por:

Junior Ronaldo Barrios Botzoc.

Aprobado:

Gloria Arévalo, M.Sc.
Asesora principal

Carlos Gauggel, Ph.D.
Asesor

Carlos Morales, Ing.Agr.
Asesor

Dania Pamela Oliva, Ing.Agr.
Asesora.

Abel Gernat, Ph.D.
Director
Departamento de Ciencia y Producción
Agropecuaria

Raúl Zelaya, Ph.D.
Decano Académico

RESUMEN

Barrios Botzoc, J.R. 2012. Determinación de la composición de la fase soluble del suelo y su impacto en la producción de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), Valle de Cantarranas, Honduras, C.A. Proyecto especial de graduación del programa de Ingeniería Agronómica, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. 18 p.

La composición de la fase soluble, es uno de los estados físico-químico más importantes en la composición de la solución del suelo, en el existen elementos susceptibles a lixiviación en comparación a los elementos que están situados en la fase intercambiable, adheridos a coloides y partículas de arcilla. La conductividad eléctrica es una forma de determinar la existencia de sales en solución, es medida en dS/m, y determina la concentración de aniones como SO_4^{2-} , PO_4^{3-} y NH_4^+ . El objetivo fue determinar la composición de la fase soluble del suelo y la conductividad eléctrica, se establecieron relaciones con la producción, cantidad de azúcar producida durante la zafra 2010 – 2011 y determinar correlaciones entre el azúcar producido, la conductividad eléctrica y contenido de iones en solución. Se tomaron 83 muestras provenientes del Ingenio Tres Valles, Valle de Catarranas, Francisco Morazán, Honduras. A cada una se le determinó la concentración de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , NO_3^- , y NH_4^+ , con los cuales se establecieron relaciones de producción. En suelos con 35 a 42% de arcilla, los iones más importantes en el aumento de los rendimientos son PO_4^{3-} y NO_3^- expresados en cmol/kg de fertilizante, en suelos con 28 a 35% de arcilla, los iones y Na^+ soluble, limitan la producción. Elementos como el Mg^{2+} en la fase soluble tiene efectos importantes en el aumento de la producción en suelos con pH de 5 a 5.5 al igual que el Ca^{2+} , K^+ y NH_4^+ . En suelos con contenidos de arcilla de 35 a 42% es recomendable aplicar nitrato de calcio y asegurar que el suelo este húmedo para que el magnesio existente pase a la fase soluble y en conjunto pueda tener efectos sobre el aumento del rendimiento, también asegurar el uso de fuentes de fertilizante que contengan NO_3^{3-} , SO_4^{2-} y PO_4^{3-} y mantener el pH por encima de 5.5.

Palabras clave. Aniones, caña de azúcar, cationes, conductividad eléctrica, fase soluble.

CONTENIDO

Portadilla	i
Página de firmas	ii
Resumen	iii
Contenido	iv
Índice de cuadros, figuras y anexos.....	v
1 INTRODUCCIÓN.....	1
2 MATERIALES Y MÉTODOS.....	4
3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	8
4 CONCLUSIONES.....	15
5 RECOMENDACIONES.....	16
6 LITERATURA CITADA.....	17

ÍNDICE DE CUADROS, FIGURAS Y ANEXOS

Cuadros	Página
1. Fertilizantes con macronutrientes usados en fincas del Ingenio Tres Valles en la zafra 2011 – 2012, expresados en kg/ha.	4
2. Fertilizantes con micronutrientes usados en fincas del Ingenio Tres Valles en la zafra 2010 – 2012, expresados en kg/ha.	5
3. Aporte porcentual de iones en los fertilizantes ¹	5
4. Iones aplicados como fertilizante, expresados en cmol/kg, Valle de Cantarranas, Francisco Morazán, Honduras ¹	6
5. Iones en relación directa y significancia estadística con la producción de azúcar (kg/ha) en relación al porcentaje de arcilla y materia orgánica en suelos del Valle de Cantarranas, Francisco Morazán, Honduras.	9
6. Iones en relación directa y significancia estadística con la producción de azúcar (kg/ha) en relación al pH en suelos del Valle de Cantarranas, Francisco Morazán, Honduras.	10
7. Iones en relación directa y baja significancia estadística con la producción de azúcar (kg/ha) en relación al porcentaje de arcilla y materia orgánica en suelos del Valle de Cantarranas, Francisco Morazán, Honduras.	11
8. Iones en relación inversa y significancia estadística con producción de azúcar (kg/ha) y el porcentaje de arcilla en suelos del Valle de Cantarranas, Francisco Morazán, Honduras.	13
9. Iones en relación inversa y baja significancia estadística con la producción de azúcar (kg/ha) y diferentes condiciones en suelos del Valle de Cantarranas, Francisco Morazán, Honduras.	14

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de los procesos físicos, químicos y biológicos en el suelo conducen a la acumulación de sustancias nutritivas necesarias para el crecimiento y desarrollo de las plantas, tales como: nitratos, amonio, fósforo, potasio, calcio, entre otros (en forma soluble y asimilable). Si los elementos nutricionales liberados no son retenidos o adsorbidos por las partículas y coloides del suelo, entonces pueden ser lavados por las aguas atmosféricas y perdidos por lixiviación (Cepeda Dovala 2002).

La solución del suelo es una fuente de la cual las plantas pueden obtener cierta cantidad de cada elemento presente en el suelo; del mismo modo, el agua de percolación transporta algo de cada elemento, pero nunca en la misma cantidad ni en la misma proporción. Los materiales más meteorizables y solubles tienden a ser evacuados del suelo con mayor rapidez – especialmente del horizonte A -, por el contrario los más resistentes permanecen en el perfil (Cepeda Dovala 2002).

El suelo es un sistema abierto, dinámico, constituido por tres fases. La fase sólida está formada por componentes inorgánicos y los orgánicos, fase líquida que puede llevar iones y sustancias en solución o en suspensión, por el aire que constituye la fase gaseosa o atmosférica del suelo y por las raíces y organismos que viven en el suelo (Porta J., *et al.* 2003). Muchos de los componentes de la fase sólida del suelo retienen moléculas o iones, en forma más o menos permanente y en cantidades aproximadamente equivalentes. La retención de iones puede producirse por medio de diferentes tipos de reacciones, particularmente en el caso de suelos con cargas variables. Los componentes sólidos, inorgánicos del suelo poseen cargas electrostáticas en su superficie, las cuales pueden ser grandes, y lo son particularmente en las fracciones de arcilla y de materia orgánica (Fassbender y Bornemiza 1994).

La interface sólido-líquido, tiene como lugar en la superficie de determinadas partículas y en su área de influencia, es allí donde tienen lugar reacciones de superficie con uniones de distintos tipos entre el elemento y la superficie. En la fase líquida, el agua del suelo puede contener elementos en la solución, así como partículas sólidas en suspensión material coloidal soluble o pseudosoluble. Los iones disueltos precipitan al secarse el suelo y al añadir agua vuelven a disolverse. Como resultado de la hidratación, una serie de moléculas de agua quedan rodeando a cada ion (Porta J., *et al.* 2003).

La fase soluble representa la fase acuosa del suelo, en o debajo de la capacidad de campo en donde ocurren las reacciones químicas del suelo. La composición de la solución del suelo varía según el contenido de humedad y el método de obtención de muestras. Los cationes (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} y NH_4^+) y los aniones (NO_3^- , HCO_3^- , Cl^- y SO_4^{2-}), son los

solutos dominantes en casi todas las soluciones de suelo (Helmke 2000). Los nutrientes en la solución del suelo existen como iones hidrogenados y en cantidades menores como moléculas inorgánicas y compuestos quelatados. Los solutos vienen principalmente de reacciones de intercambio y desorción entre los sólidos y la fase acuosa (Foth y Ellis 1997). La fase líquida se halla en cambio constante, tanto en cantidad como en composición. La lluvia, el riego y las filtraciones incorporan agua al sistema, el aporte de agua diluye el contenido iónico de la fase líquida y la evapotranspiración concentra la solución del suelo (Porta J., *et al.* 2003).

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) se expresa como el número de moles de iones con carga positiva adsorbidos, que pueden ser intercambiados por unidad de masa seca de suelo. Se expresa en centimoles de carga positiva por kilogramo, $\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$ o bien $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$, lo común es que se utiliza como unidad el $\text{meq}/100\text{g}$ (Porta J., *et al.* 2003). Por otra parte la capacidad de intercambio catiónico efectiva CICE, es la capacidad de intercambio catiónico que corresponde a las condiciones del suelo en el campo. Depende del tipo y cantidad de componentes inorgánicos y orgánicos del suelo. En suelos con pH inferiores a 5.5, puede haber aluminio intercambiable, al elevar el pH, el aluminio precipita en forma de $\text{Al}(\text{OH})_3$. Al precipitar, liberará cargas de intercambio que estaban bloqueadas, con lo que el valor de CIC determinado a pH 7.0 será más elevado que el efectivo al pH del suelo, que es el real en condiciones de campo (Porta J. *et al.* 2011).

La absorción de nutrientes de la raíz de las plantas desde la solución del suelo y el nivel de equilibrio de los nutrientes en la solución del suelo al tiempo que la absorción comienza, es un factor en la que determina la tasa a la cual la raíz de la planta pueda absorber los nutrientes (Barber 1984). Los nutrientes se absorben como solutos, estos son absorbidos en la superficie de las raíces por intercepción de elementos, flujo de masas y por difusión. Por intercepción de elementos, la cantidad de elementos interceptados es igual al volumen de suelo ocupado por las raíces. Flujo de masas, tanto el agua como los solutos son movidos a la superficie de la raíz por transpiración, con una relación directa en donde a más concentración de solutos existirá una mayor cantidad de elementos traídos a la superficie de la raíz. La difusión está complementa el movimiento de nutrientes por flujo de masas y la combinación de los dos equivale al 99% del movimiento de nutrientes a las raíces (Foth y Ellis 1997).

Los suelos salinos son aquellos que contienen en la fase líquida cantidades importantes de iones, procedentes de la disolución de sales más solubles que el yeso y, en mucha menor medida, de la meteorización. También la salinidad puede ser un proceso entrópico por el uso para riego de aguas de mala calidad depositando sales en la zona de enraizamiento en suelos donde no se ha previsto un drenaje artificial asociado al sistema de riego. (Porta J. *et al.* 2011). Los suelos salinos tienen niveles altos de sales solubles, excepto el sodio. La salinidad del suelo puede medirse fácilmente pasando una corriente eléctrica a través de una solución extraída de una muestra de suelo. Cuanto mayor es el contenido en sal, mas electricidad pasará (Plaster 2005).

La lectura de conductividad es directamente proporcional a la salinidad de la solución medida, expresada en mmhos/cm o unidades del Sistema Internacional como dS/m . (Arévalo y Gauggel. 2009). Un suelo salino está definido como un suelo con una

conductividad de cuatro o más decisiems por metro (dS/m). Sin embargo niveles de salinidad tan bajos como dos dS/m pueden perjudicar a las cosechas. La mayoría de las sales son cloruros o sulfatos. Diferentes factores influyen la concentración de iones en la solución del suelo entre ellos la solubilidad, adsorción y desorción e intercambio y la concentración de fertilizantes como sales solubles tal como el KCl, nitratos y sulfatos usados como fertilizantes. En suelos donde llueve poco no hay suficiente lavado de sales desde el perfil del suelo por lo que se acumula y alcanza niveles altos principalmente en el horizonte A (Barber 1984). Se puede ver una corteza blanca en la superficie del suelo debido a emigración de sales a la superficie por medio de la elevación capilar. Su efecto principal es hacerle más difícil a las plantas la absorción de agua del suelo. En suelos no salinos, solo la atracción del agua por las partículas del suelo (potencial matricial) contribuye al potencial del agua total (Plaster 2005).

El Ingenio Tres Valles, ubicado en el Valle de Cantarranas, Honduras, ha modificado desde ya hace unos años, sus programas de fertilización, incrementando las aplicaciones de fertilizantes solubles, a través de los sistemas de riego por goteo, mejorando así las producciones de sus campos; además ha implementado el programa de análisis de suelos de todas las tierras con el fin de aplicar programas de fertilización acondicionados al verdadero estado de suelo. Es por esa razón que se ha decidido realizar este estudio el cual tuvo por objeto:

- Determinar la relación que existe entre la cantidad de azúcar producida, condiciones en los suelos y diferentes elementos formadores de la fase soluble.
- Conocer la relación que existe entre los fertilizantes aplicados y el incremento de la producción en el cultivo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum L.*)

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Selección de las muestras. Cada año El ingenio Tres Valles tiene como objetivo obtener información acerca de los suelos que actualmente cultiva con caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), esto con el fin de tomar decisiones acerca de la fertilización que se aplicará en el ciclo próximo después de cada zafra. Las muestras fueron seleccionadas según el interés del Ingenio Tres valles, estas fueron 83 e ingresaron al laboratorio de suelos de la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano entre el 2010 y 2011, representativas a la zafra con misma fecha. Las 83 muestras fueron seleccionadas de cuatro fincas a criterio del Ingenio Tres Valles (finca Caña Brava, Finca flor Azul, Finca La Granadilla y Finca Los Encuentros)

Análisis de laboratorio. En todas las muestras se determinó materia orgánica, pH, N, P, K, Ca, Mg, Na, S, Cu, Fe, Mn, Zn y B en el año 2011, a estas mismas muestras se les determinó la conductividad eléctrica CE por medio de pasta saturada (Arévalo y Gauggel 2011), la concentración de cloruros Cl^- usando el método de titulación con nitrato de plata AgNO_3 (Adriano y Doner 1982), la concentración de potasio, calcio, magnesio y sodio por medio de Espectrofotometría de Absorción Atómica (Parviz *et al.* 1982) También se cuantificó la concentración de amonio NH_4^+ determinado por el método de Kjeldahl (Bremner y Mulvaney 1982) fosfato PO_4^{3-} determinado con molibdato de amonio y sulfatos SO_4^{2-} determinado por turbidez.

Fertilizantes usados en las fincas: se registraron los fertilizantes usados en la zafra 2011 – 2012 (Cuadros 1 y 2).

Cuadro 1. Fertilizantes con macronutrientes usados en fincas del Ingenio Tres Valles en la zafra 2011 – 2012, expresados en kg/ha.

Finca	Nitrato de amonio	Sulfato de Amonio	MAP 25	Ácido Fosfórico kg/ha	KCl Soluble
Caña Brava	263	413	60	40	93
Flor Azul	256	217	75	32	139
La Granadilla	256	217	75	32	174
Los Encuentros	183	174	54	32	139

Fuente. Ing. Agr. Carlos Morales, Ingenio Tres Valles.

Cuadro 2. Fertilizantes con micronutrientes usados en fincas del Ingenio Tres Valles en la zafra 2010 – 2012, expresados en kg/ha.

Finca	Sulfato de Mg	Sulfato de Cu	Sulfato de Mn	Sulfato de Zn	SoluBor
Caña Brava	55	0.6	8	7	3
Flor Azul	-	0.6	7	5	4
La Granadilla	-	0.6	5	17	3
Los Encuentros	-	0.5	6	4	3

Fuente. Ing. Agr. Carlos Morales, Ingenio Tres Valles.

También fue necesario considerar el contenido de iones en los fertilizantes, expresados en porcentaje, esto con el fin de cuantificar el fertilizante en cmol/kg (Cuadro 3).

Cuadro 3. Aporte porcentual de iones en los fertilizantes¹.

Fertilizante	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	PO ₄ ³⁻	K ⁺	Cl ⁻	Mg ²⁻
Sulfato de amonio, (NH ₄) ₂ SO ₄	28		72				
Nitrato de amonio, NH ₄ NO ₃	24	76					
Cloruro de potasio, KCl					52	48	
DAP, 18 – 46 – 0 (NH ₄) ₂ H ₂ PO ₄	27			73			
MAP, (NH ₄) ₂ HPO ₄	15			85			
Acido fosfórico, HPO ₄				99			
Sulfato de magnesio, (MgSO ₄).7H ₂ O			40				9.70

Variables determinadas. Las variables analizadas y aplicadas a cada muestra de suelo proveniente de cada finca del Ingenio Tres Valles, fueron: producción de caña (t/ha), azúcar (kg/t, t/ha), pH, porcentaje de materia orgánica, porcentaje de arcilla, bases intercambiables (K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺), conductividad eléctrica CE, cationes solubles (K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ y NH₄⁺), aniones solubles (PO₄³⁻, Cl⁻ y SO₄²⁻) y iones aplicados como fertilizante (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, NH₄⁺, NO₃⁻, PO₄³⁻, SO₄²⁻, y Cl⁻).

¹Arévalo, G. Profesor Asociado al departamento de Ciencia y Producción Agropecuaria, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. Cálculo.

Variabes calculadas. A partir de los datos obtenidos en el análisis de laboratorio, se determinó la capacidad de intercambio catiónico CIC, por sumatoria de bases ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+ + \text{K}^+$), donde se calculó la capacidad de intercambio catiónico efectiva CICE a partir de la sumatoria de la acidez intercambiable y bases [$\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+ + \text{K}^+ + (\text{Acidez intercambiable})$], porcentaje de saturación de bases [$[(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+ + \text{K}^+) \text{cmol.kg}^{-1} / \text{CICE cmol.kg}^{-1}] \times 100$] y relaciones entre elementos expresados en cmol/kg, $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$, $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{K}^+$, $\text{Ca}^{2+}/\text{K}^+$ y $\text{Mg}^{2+}/\text{K}^+$. También se calculó la suma de cationes solubles expresados en cmol/kg [$\sum (\text{K}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Mg}^{2+}, \text{Na}^+ \text{ y } \text{NH}_4^+)$], las bases intercambiables (bases totales del suelo – cationes solubles), porcentaje de cationes solubles [(cationes solubles/bases intercambiables) $\times 100$] y la sumatoria de aniones solubles [$\sum (\text{PO}_4^{3-} + \text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^-)$]. A partir de los fertilizantes aplicados en cada finca (Cuadro 1 y 2), se calculó el aporte de iones de cada uno de ellos expresados en cmol/kg (Cuadro 4). Para establecer relaciones en cuanto a conductividad eléctrica CE, kg azúcar/ha, aniones solubles, bases solubles y bases intercambiables, fue necesario la conversión de los fertilizantes a un mismo valor de estudio (Cuadro 4).

Cuadro 4. Iones aplicados como fertilizante, expresados en cmol/kg, Valle de Cantarranas, Francisco Morazán, Honduras¹.

Finca	NH_4^+	NO_3^-	PO_4^{3-}	SO_4^{2-}	K^+	Cl^-
Caña Brava	0.43	0.17	0.17	0.42	0.05	0.05
Flor Azul	0.31	0.16	0.18	0.20	0.08	0.08
La Granadilla	0.31	0.16	0.18	0.20	0.10	0.10
Los Encuentros	0.23	0.12	0.14	0.16	0.08	0.08

Diseño experimental. Debido a la naturaleza del estudio, el diseño experimental no pudo ser aplicado por lo tanto solo se usó estadística descriptiva.

¹Arévalo, G. Profesor asociado al departamento de Ciencia y Producción Agropecuaria, Zamorano, comunicación personal.

Análisis estadístico. Con el total de datos obtenidos, se establecieron correlaciones de Pearson, identificando relaciones de cada variable con una correlación mayor o igual a 0.60 a una probabilidad menor o igual a 0.05. Para describir la relación que existe entre la conductividad eléctrica CE y los elementos de la fase soluble del suelo, elementos de la fase intercambiable del suelo, relaciones de elementos ($\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$, $(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})/\text{K}^{+}$, $\text{Ca}^{2+}/\text{K}^{+}$ y $\text{Mg}^{2+}/\text{K}^{+}$) y fertilizantes aplicados durante la zafra 2010 – 2011 todos ellos en relación a la producción. Para explicar la relación que existe entre cada una mediante una ecuación con R^2 . Todo esto fue determinado por medio del software de análisis estadístico, SAS[®] Statical Analisis Sistem. Posteriormente para establecer un mejor análisis, los resultados fueron agrupadas por pH (< 5, 5 – 5.5, 5.5 – 6, 6 – 6.5 y > 6.5), por porcentaje de arcilla (< 10, 10 – 18, 18 – 28, 28 – 35, 35 – 42 y > 42) y por último fueron clasificadas por el contenido de materia orgánica M.O (< 1%, 1 – 2%, 2 – 4% y > 4%).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Iones con relación directa a la producción de azúcar. Se encontró relación directamente proporcional a la producción de azúcar (kg/ha) en suelos con textura franco arcillosa y un porcentaje de arcilla de entre 35 a 42, muy altamente significativa ($P < 0.01$) y el fosfato (PO_4^{3-}) del fertilizante, y altamente significativo ($P < 0.05$) con Ca soluble y NO_3^- provisto por fertilizantes. Los iones solubles y la conductividad eléctrica tienen relación directa con coeficiente de Pearson de 0.60 a 0.65 y significativo, pero al establecer el modelo de ecuación, el R^2 es muy bajo, por lo cual no son confiables estos parámetros para predecir el azúcar a obtener (Cuadro 5). Los iones solubles expresados como porcentaje del total de iones del suelo, tiene relación directa con la producción de azúcar, con baja significancia estadística (0.11) y un bajo R^2 de (0.51) (Cuadro 5), en suelos con materia orgánica $< 1\%$.

El pH, determina el comportamiento de los iones solubles en relación a la producción de azúcar. En suelos de pH de entre 5 a 5.5, se puede estimar la producción de azúcar a partir de Mg^{2+} soluble, con muy alta significancia estadística ($P < 0.001$) y un $R^2 > 90\%$. Ca^{2+} y K^+ solubles, tiene también una alta relación con los rendimientos de azúcar producido, aunque con menor significancia ($P < 0.05$) y un $R^2 > 70\%$. El ion amonio soluble (NH_4^+) tiene menor relación con la producción ($P \leq 0.06$) y un R^2 74% (Cuadro 6). En suelos con pH entre 5.5 a 6, son los iones del fertilizante los que determinan la producción de azúcar (NH_4^+ , NO_3^- , PO_4^{3-} y SO_4^{2-}), con una probabilidad de ($P \leq 0.03$) y un R^2 de 52% de manera lineal (Cuadro 6).

En suelos con arcilla entre 18 a 28% se encontró relaciones de media significancia según coeficiente de Pearson ($P > 0.60$) y probabilidades menores a ($P < 0.05$) entre producción de azúcar y variables como porcentaje de iones solubles, Cl^- y NH_4^+ del fertilizante. En algunos suelos, esta relación no es lineal ya que el R^2 es muy bajo (< 0.60) (Cuadro 7). En suelos arcillosos ($> 42\%$), hay una tendencia a explicar la producción de azúcar en relación a los nutrientes provistos por los fertilizantes (NH_4^+ , NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-}), sin embargo el R^2 es muy bajo (0.35), por lo que no es predecible el rendimiento de azúcar obtener. La misma tendencia ocurre con el fosfato provisto por el fertilizante en suelos con materia orgánica de 1 a 2% (Cuadro 7).

Cuadro 5. Iones en relación directa y significancia estadística con la producción de azúcar (kg/ha) en relación al porcentaje de arcilla y materia orgánica en suelos del Valle de Cantarranas, Francisco Morazán, Honduras.

Característica del suelo	rango	Iones	Unidad	Pearson	P		Azúcar (kg/ha)=	R ²	R ² aj.
% arcilla	35 - 42	PO ₄ ³⁻ fertilizante	cmol.kg ⁻¹	0.81	0.01	***	-27533 + 251198(PO ₄ ³⁻ fertilizante)	0.65	0.60
		Ca ²⁺ soluble		0.76	0.02	**	6261.76 + 17688 (Ca ²⁺ soluble)	0.57	0.51
		NO ₃ ⁻ fertilizante		0.75	0.02	**	-17900 + 216229(NO ₃ ⁻ fertilizante)	0.57	0.50
		Iones solubles	%	0.60	0.09	*	8106.87 + 3941.27(Iones solubles)	0.36	0.27
		CE	dS.m ⁻¹	0.65	0.06	*	5737.46 + 12686(CE)	0.07	0.34
δ% MO	< 1	Iones solubles	%	0.80	0.11		2438.70 + 5743.59(Iones solubles)	0.63	0.51
		Na ⁺ soluble	cmol.kg ⁻¹	0.80	0.11		1681.19 + 126762(Na ⁺ soluble)	0.64	0.52

Valores con *, indican el nivel de significancia estadística, cuando: *** altamente significativo, ** medianamente significativo, * baja significancia.

Valores sin * indican que existe relación pero sin significancia estadística. δ%MO = Porcentaje de Materia Orgánica.

Cuadro 6. Iones en relación directa y significancia estadística con la producción de azúcar (kg/ha) en relación al pH en suelos del Valle de Cantarranas, Francisco Morazán, Honduras.

Característica del suelo	rango	Iones	Unidad	Pearson	P		Azúcar (kg/ha)=	R ²	R ² aj.
pH	5 a 5.5	Mg ²⁺ soluble	cmol.kg ⁻¹	0.97	0.01	***	6824.62 + 268502(Mg ²⁺ soluble)	0.93	0.91
		Ca ²⁺ soluble		0.89	0.04	**	7278.59 + 100014(Ca ²⁺ soluble)	0.79	0.72
		K ⁺ soluble		0.90	0.04	**	8287.96 + 411983(K ⁺ soluble)	0.82	0.76
		NH ₄ ⁺ soluble		0.86	0.06	*	5236.86 + 25510(NH ₄ ⁺ soluble)	0.74	0.65
5.5 a 6		NH ₄ ⁺ fertilizante	cmol.kg ⁻¹	0.73	0.03	**	-47850 + 208045(NH ₄ ⁺ fertilizante)	0.53	0.46
		NO ₃ ⁻ fertilizante		0.73	0.03	**	-49931 + 416090(NO ₃ ⁻ fertilizantes)	0.53	0.46
		PO ₄ ³⁻ fertilizante		0.73	0.03	**	-58253 + 416090(PO ₄ ³⁻ fertilizante)	0.53	0.46
		SO ₄ ²⁻ fertilizante		0.73	0.03	**	-66574 + 416090(SO ₄ ²⁻ fertilizante)	0.53	0.46

Valores con *, indican el nivel de significancia estadística, cuando: *** altamente significativo, ** medianamente significativo, * baja significancia. Valores sin * indican que existe relación pero sin significancia estadística.

Cuadro 7. Iones en relación directa y baja significancia estadística con la producción de azúcar (kg/ha) en relación al porcentaje de arcilla y materia orgánica en suelos del Valle de Cantarranas, Francisco Morazán, Honduras.

Característica del suelo	%	Iones	Unidad	Pearson	P		Azúcar (kg/ha)=	R ²	R ² aj.
% arcilla	18 - 28	Iones solubles	%	0.38	0.03	**	13677 + 865.01 (Iones solubles)	0.14	0.12
		Cl ⁻ fertilizante	cmol.kg ⁻¹	0.32	0.06	*	-14123 + 369994 (Cl ⁻ fertilizante)	0.10	0.08
	> 42	NH ₄ ⁺ fertilizante	cmol.kg ⁻¹	0.60	0.12		-9667.52 + 76070 (NH ₄ ⁺ fertilizante)	0.35	0.25
		NO ₃ ⁻ fertilizante		0.60	0.12		-10428 + 152141 (NO ₃ ⁻ fertilizante)	0.35	0.25
		PO ₄ ³⁻ fertilizante		0.60	0.12		-13471 + 152141 (PO ₄ ³⁻ fertilizante)	0.35	0.25
		SO ₄ ²⁻ fertilizante		0.60	0.12		-15514 + 152141 (SO ₄ ²⁻ fertilizante)	0.35	0.25
°% MO	1 a 2	PO ₄ ³⁻ fertilizante	cmol.kg ⁻¹	0.34	0.03	**	-33113 + 309325 (PO ₄ ³⁻ fertilizante)	0.12	0.09

Valores con *, indican el nivel de significancia estadística, cuando: *** altamente significativo, ** medianamente significativo, * baja significancia. **Valores sin *** indican que existe relación pero sin significancia estadística. °%MO = Porcentaje de Materia Orgánica.

Iones con relación inversa a la producción de azúcar. En suelos franco arcillosos con arcilla entre 28 a 35%, existe una relación inversa entre la producción, de azúcar y el contenido de iones solubles. La suma de todos tiene una muy alta significancia inversamente proporcional a la producción de azúcar ($P \leq 0.01$) y un R^2 mayor a 0.90; el Na^+ soluble posee una relación inversa a los rendimientos con alta significancia estadística ($P < 0.03$) y un R^2 mayor a 0.80; K^+ , NH_4^+ y Mg^+ solubles tienen una relación inversa y correlación con la producción de azúcar ($P 0.06$ a 0.1) y un R^2 (0.65 a 0.73) (Cuadro 8). En suelos con un porcentaje de arcilla de 35 a 42% el Mg^{2+} intercambiable y el NH_4^+ soluble también tiene un efecto inversamente proporcional a la producción de azúcar con una probabilidad de 0,001 y 0.02 respectivamente y un R^2 de (0.58 a 0.74) (Cuadro 8). En suelos arcillosos, con más de 42% de arcilla, la presencia de Na^+ intercambiable limita la producción de azúcar ($P < 0.07$) con un R^2 de 0.45 (Cuadro 8).

Otros iones que también limitan la producción de azúcar, fueron el Mg^{2+} , Ca^{2+} intercambiable y Cl^- soluble, en suelos con un porcentaje de arcilla de 18 a 28%, $\text{pH} > 6.5$ y un porcentaje de materia orgánica de entre 1 a 4%, aunque con muy baja significancia estadística (Cuadro 9).

Cuadro 8. Iones en relación inversa y significancia estadística con producción de azúcar (kg/ha) y el porcentaje de arcilla en suelos del Valle de Cantarranas, Francisco Morazán, Honduras.

% Arcilla	Variable	Unidad	Pearson	P		Azúcar (kg/ha)=	R ²	R ² aj.
28 a 35	Iones solubles	%	-0.97	0.01	***	25279 - 5609.48(Iones solubles)	0.94	0.92
	Na ⁺ soluble		-0.92	0.03	**	21289 - 49401(Na ⁺ soluble)	0.84	0.78
	K ⁺ soluble	cmol.kg ⁻¹	-0.86	0.06	*	16566 - 731055(K ⁺ soluble)	0.73	0.64
	NH ₄ ⁺ soluble		-0.83	0.08	*	27831 - 39252(NH ₄ ⁺ soluble)	0.68	0.58
	Mg ²⁺ soluble		-0.81	0.10	*	27565 - 526497(Mg ²⁺ soluble)	0.65	0.54
35 - 42	Mg ²⁺ intercambiable	cmol.kg ⁻¹	-0.86	0.001	***	25128 - 3086.62(Mg ²⁺ intercambiable)	0.74	0.71
	NH ₄ ⁺ soluble		-0.76	0.02	**	25213 - 16044(NH ₄ ⁺ soluble)	0.58	0.52
> 42	Na ⁺ intercambiable	cmol.kg ⁻¹	-0.67	0.07	*	18930 - 7879.38(Na ⁺ intercambiable)	0.45	0.36
	Cl ⁻ soluble		-0.71	0.05	**	17508 - 6201.62(Cl ⁻ soluble)	0.51	0.43

Valores con *, indican el nivel de significancia estadística, cuando: *** altamente significativo, ** medianamente significativo, * baja significancia. **Valores sin *** indican que existe relación pero sin significancia estadística.

Cuadro 9. Iones en relación inversa y baja significancia estadística con la producción de azúcar (kg/ha) y diferentes condiciones en suelos del Valle de Cantarranas, Francisco Morazán, Honduras

Característica del suelo	rango	Iones	Unidad	Pearson	P	Azúcar (kg/ha)=	R ²	R ² aj.	
% arcilla	18 - 28	Mg ²⁺ intercambiable	cmol.kg ⁻¹	-0.36	0.03	**	23989 - 3865.07(Mg ²⁺ intercambiable)	0.13	0.10
		Ca ²⁺ intercambiable		-0.38	0.03	**	24022 - 913.09(Ca ²⁺ intercambiable)	0.14	0.12
		Cl ⁻ soluble		-0.29	0.09	*	azúcar/ha = 21239 - 5490.08(Cl ⁻ soluble)	0.08	0.06
pH	> 6.5	Mg ²⁺ intercambiable	cmol.kg ⁻¹	-0.39	0.02	**	32330 - 6063.76(Mg ²⁺ intercambiable)	0.15	0.13
				-0.29	0.10	*	27842 - 11589(Cl ⁻ soluble)	0.09	0.06
°% MO	1 a 2	Cl ⁻ soluble	cmol.kg ⁻¹	-0.34	0.03	**	30391 - 13675(Cl ⁻ soluble)	0.12	0.09
	2 a 4	Mg ²⁺ intercambiable		-0.26	0.12		26940 - 4044.40(Mg ²⁺ intercambiable)	0.07	0.05

Valores con *, indican el nivel de significancia estadística, cuando: *** altamente significativo, ** medianamente significativo, * baja significancia.

Valores sin * indican que existe relación pero sin significancia estadística. °%MO = Porcentaje de Materia Orgánica.

4. CONCLUSIONES

- El pH y el contenido de arcilla en un suelo, tienen una marcada influencia en la producción de azúcar en relación a la disponibilidad de iones solubles.
- Nitratos y fosfatos contenidos en los fertilizantes, son determinantes en la producción de azúcar en suelos con un porcentaje de arcilla de entre 35 a 42%.
- En suelos con pH fuertemente ácido, de 5 a 5.5, los cationes solubles (Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+ , NH_4^+) determinan la producción de azúcar.
- En suelos con un porcentaje de arcilla de entre 28 a 35% los iones solubles y el Na^{2+} soluble limitan la producción de caña de azúcar (*Saccharum officinarum L.*).

5. RECOMENDACIONES

- Aplicar fertilizantes que contengan nitratos NO_3^- y fosfatos PO_4^{3-} ya que estos aumentan los rendimientos de azúcar en suelos que contengan un porcentaje de arcilla de 35 a 42%.
- En suelos con un porcentaje de arcilla de entre 35 a 42%, aplicar nitrato de calcio y asegurar la humedad en el suelo para que el Mg^{2+} pase a fase soluble.
- En suelos con arcilla de entre 28 a 35% no sobre irrigar para evitar la solubilización de iones y Na^{2+} .
- Mantener el pH arriba de 5.5 para asegurar efectividad en la absorción de iones (Mg^{2+} , K^+ , Ca^{2+} , NH_4^+) y asegurar la aplicación de fuentes de fertilizante de fuentes con NO_3^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} .

6. LITERATURA CITADA

Adriano, D.C. and Doner, H.E. 1982. Bromine, Chlorine and Fluorine, *in*: Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties. Second edition. Wisconsin USA. p 455.

Arévalo, G., C. Gauggel. 2009. Manual de laboratorio de Ciencia de suelos y aguas. Francisco Morazán, Honduras. 73 p.

Arévalo, G., C. Gauggel. 2011. Manual de prácticas. Curso de manejo de suelos y nutrición vegetal. Francisco Morazán, Honduras. 77 p.

Barber, R. 1984. Manejo de suelos y cultivos en zonas de ladera de América Central. Servicio de Gestión y Conservación de los Recursos de Suelos, FAO. 82 p.

Bremner, J.U., Mulvaney, C.S. 1982. Nitrogen Total. *In*: Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties. Second edition. Wisconsin USA. p595.

Cepeda Dovala, J.M. 1991. Química de Suelos. Mexico D.F. editorial Trillas S.A. 167 p.

Fassbender, H.W., E. Bornemiza. 1994. Química de Suelos con énfasis en suelos de América Latina. San Jose Costa Rica. Editorial Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. 420 p.

Foth, H.D., Ellis, B.G. 1997. Soil Fertility. Second edition. United State of America. CRC press. 289p.

Helmke, P.A. 2000. The Chemical composition of Soils. *In*: E. Malcom (ed) Handbook of Soil Science. Sumer RCC press LLC. United State of America. pB22 - B23.

Parviz N., Soltanpour, J. Benton Jones, JR. and. Workman, S.M. 1982. Optical Emission Spechtrometry. *In: Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Propertres.* Second edition. Wisconsin USA. p3

Plaster, E.J. 2005. *La ciencia del Suelo y su Manejo.* Madrid, España. 419 p.

Porta J., M. Lopez Acevedo y C. Roquero. 2003. *Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente.* 3era. edición. Mundi Prensa. Madrid, España. 960 p.

Porta J., M. López Acevedo y R., Poch Claret. 2011. *Introducción a la Edafología, uso y protección de suelos.* 2da edición. Mundi prensa. Madrid, España. 535 p.