

**Determinación de la acidez intercambiable
($Al^{+3}+H^{+}$) a partir del pH para la estimación
de la capacidad de intercambio catiónico
(CIC) en suelos de la cuenca del Pacífico en El
Salvador, Honduras y Nicaragua**

Dania Pamela Oliva Escobar

Zamorano, Honduras
Diciembre; 2009

ZAMORANO
CARRERA DE CIENCIA Y PRODUCCIÓN AGROPECUARIA

**Determinación de la acidez intercambiable
($Al^{+3}+H^+$) a partir del pH para la estimación
de la capacidad de intercambio catiónico
(CIC) en suelos de la cuenca del Pacífico en El
Salvador, Honduras y Nicaragua**

Proyecto especial presentado como requisito parcial para optar
al título de Ingeniera Agrónoma en el
Grado Académico de Licenciatura

Presentado por

Dania Pamela Oliva Escobar

Zamorano, Honduras
Diciembre; 2009

Determinación de la acidez intercambiable ($Al^{+3}+H^{+}$) a partir del pH para la estimación de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) en suelos de la cuenca del Pacífico en El Salvador, Honduras y Nicaragua

Presentado por:

Dania Pamela Oliva Escobar

Aprobado:

Gloria Arévalo, M.Sc.
Asesora principal

Miguel Vélez, Ph.D.
Director
Carrera de Ciencia y Producción
Agropecuaria

Carlos Gauggel, Ph.D.
Asesor

Raúl Espinal, Ph.D.
Decano Académico

Hilda Emérida Flores, Ing. Química
Asesora

Alfredo Rueda, Ph.D.
Asesor

Kenneth L. Hoadley, D.B.A.
Rector

Abelino Pitty, Ph.D.
Coordinador
Área de Fitotecnia

RESUMEN

Oliva D. 2009. Determinación de la acidez intercambiable ($Al^{+3}+H^{+}$) a partir del pH para la estimación de la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) en suelos de la cuenca del Pacífico en El Salvador, Honduras y Nicaragua. Proyecto Especial del Programa de Ingeniera Agrónoma, Escuela Agrícola Panamericana, El Zamorano. Tegucigalpa, Honduras.

La fertilidad del suelo se basa en expresar el contenido de bases por saturación (en relación a la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)). Para calcular la CIC por sumatoria de cationes, es necesario conocer la acidez intercambiable ($Al^{+3}+H^{+}$). El objetivo del estudio fue encontrar la relación entre la acidez intercambiable y pH del suelo, y relacionarla con porcentaje de arcilla, textura y contenido de materia orgánica, en 100 muestras seleccionadas. Se determinó pH en agua 1:1 (pH_{H_2O}) y KCl 1N (pH_{KCl}), textura (Boyucos), materia orgánica (Walkey & Black), acidez intercambiable extraída con KCl (Bremner y Mulyaney) y se calculó la CIC, capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE), y saturación de aluminio (%SAI). Mediante correlaciones, se calcularon ecuaciones para establecer la relación entre acidez intercambiable, Al^{+3} , H^{+} , CIC, CICE y %SAI con pH_{H_2O} y pH_{KCl} de todas las muestras y por grupos según material parental: volcánicos, ignimbritas claras (riolitas y andesitas), tobas y cenizas volcánicas y aluvión cuaternario. Se calculó la acidez intercambiable a partir de la ecuación con mejor correlación y se comparó con la acidez determinada. La mejor relación para todas las muestras se encontró entre acidez intercambiable y pH_{KCl} : $(Al^{+3}+H^{+}) = (72.2120) - (30.5863 \times pH_{KCl}) + (3.23248 \times pH_{KCl}^2)$ ($R^2 = 67\%$). Por resultados similares con la acidez determinada, los valores de $(Al^{+3}+H^{+})$ dependen del pH y se propone usar 3 cmol.kg^{-1} a pH medido en agua en el rango de 4 a 4.5, 1.3 cmol.kg^{-1} pH 4.5 a 5, 0.5 cmol.kg^{-1} pH 5 a 5.5, 0.1 cmol.kg^{-1} pH 5.5 a 6 y 0 cmol.kg^{-1} pH > 6. Hay influencia del material parental en la acidez intercambiable. En suelos volcánicos y de tobas volcánicas hay mejor relación entre pH_{KCl} y acidez intercambiable ($r = -0.873$ y -0.759). En suelos procedentes de aluviones estimar la acidez intercambiable en función del pH_{H_2O} ($r = -0.824$).

Palabras clave: Aluvial, carga variable, CICE, ignimbritas claras sustitución isomórfica volcánico, tobas y cenizas volcánicas.

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	6
4. CONCLUSIONES	12
5. RECOMENDACIONES	13
6. LITERATURA CITADA	14
7. ANEXOS	16

ÍNDICE DE CUADROS, FIGURAS Y ANEXOS

Cuadro

1. Clasificación de las muestras por material parental y lugar de procedencia.	4
2. Correlación (r) entre el $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$, pH_{KCl} y aluminio intercambiable (Al^{+3}), hidrógeno intercambiable (H^+) y acidez intercambiable ($\text{Al}^{+3}+\text{H}^+$) en suelos de la cuenca del Pacífico en El Salvador, Honduras y Nicaragua.	9
3. Ecuaciones para la determinación de la acidez intercambiable ($\text{Al}^{+3}+\text{H}^+$) a partir de $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ y pH_{KCl} en suelos de la cuenca del Pacífico en El Salvador, Honduras y Nicaragua.	10
4. Ecuaciones para la determinación del aluminio intercambiable (Al^{+3}) a partir de $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ y pH_{KCl} en suelos de la cuenca del Pacífico en El Salvador, Honduras y Nicaragua.	10
5. Ecuaciones para la determinación de hidrógeno intercambiable (H^+) a partir de $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ y pH_{KCl} en suelos de la cuenca del Pacífico en El Salvador, Honduras y Nicaragua.	11
6. Correlación (r) entre $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$, pH_{KCl} y capacidad de intercambio catiónico (CIC), Capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICe) y saturación de aluminio (%) en suelos de la cuenca del Pacífico en El Salvador, Honduras y Nicaragua.	11
7. Acidez intercambiable ($\text{Al}^{+3}+\text{H}^+$) medida y calculada en cmol.kg^{-1} de suelo según la fórmula de regresión.	11

Figura

1. Relación entre $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ y acidez intercambiable ($\text{Al}^{+3}+\text{H}^+$) en suelos de la cuenca del Pacífico en El Salvador, Honduras y Nicaragua.	6
2. Relación entre el contenido de arcilla y acidez intercambiable ($\text{Al}^{+3}+\text{H}^+$) en suelos de la cuenca del Pacífico en El Salvador, Honduras y Nicaragua.	7
3. Relación entre el contenido de materia orgánica y acidez intercambiable ($\text{Al}^{+3}+\text{H}^+$) en suelos de la cuenca del Pacífico en El Salvador, Honduras y Nicaragua.	7

Anexo

1. Relación entre $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ y acidez intercambiable ($\text{Al}^{+3}+\text{H}^+$) en suelos del centro y sur de Honduras con procedencia de material parental aluvión.	16
2. Relación entre $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ y aluminio intercambiable (Al^{+3}) en suelos del centro y sur de Honduras con procedencia de material parental aluvión.	16
3. Relación entre pH_{KCl} e hidrógeno intercambiable (H^+) en suelos del centro y sur de Honduras con procedencia de material parental aluvión.	17
4. Relación entre pH_{KCl} y acidez intercambiable ($\text{Al}^{+3}+\text{H}^+$) en suelos de Nicaragua y El Salvador con procedencia de material parental volcánico.	17
5. Relación entre pH_{KCl} y aluminio intercambiable (Al^{+3}) en suelos agrícolas de Nicaragua y El Salvador con procedencia de material parental volcánico.	17
6. Relación entre pH_{KCl} e hidrógeno intercambiable (H^+) en suelos de Nicaragua y El Salvador con procedencia de material parental volcánico.	18
7. Relación entre pH_{KCl} y acidez intercambiable ($\text{Al}^{+3}+\text{H}^+$) en suelos del centro y sur de Honduras con procedencia de material parental tobas y cenizas volcánicas.	18
8. Relación entre pH_{KCl} e hidrógeno intercambiable (H^+) en suelos del centro y sur de Honduras con procedencia de material parental tobas y cenizas volcánicas.	18
9. Relación entre pH_{KCl} y acidez intercambiable ($\text{Al}^{+3}+\text{H}^+$) en suelos del centro y sur de Honduras de los cuatro grupos.	19
10. Relación entre pH_{KCl} y aluminio intercambiable (Al^{+3}) en suelos del centro y sur de Honduras de los cuatro grupos.	19
11. Relación entre pH_{KCl} e hidrógeno intercambiable (Al^{+3}) en suelos del centro y sur de Honduras de los cuatro grupos.	19
12. Mapa geológico de Honduras	20
13. Mapa geológico de Nicaragua	20
14. Principales zonas de acuíferos de El Salvador.	21

1. INTRODUCCIÓN

La Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) es la carga eléctrica de las arcillas y materia orgánica del suelo, ésta puede ser permanente o dependiente del pH, se expresa en cmol.kg^{-1} de suelo. La carga que depende del pH ocurre por rupturas en la periferia de los cristales de los minerales. Suelos muy ácidos, meteorizados, pueden desarrollar carga positiva y por tanto pueden alcanzar capacidad de intercambio aniónico (atraen partículas negativamente cargadas como algunas formas de Cl y P); esto se refleja como muy baja fertilidad natural y fijación de fósforo (Arévalo y Gauggel 2008).

Hay diferentes métodos para la determinación de la CIC y difiere por diferentes factores que dependen de los tipos de iones usados para el desplazamiento de los mismos. Hay tres tipos de determinación de CIC (Boul *et al.* 2003).

1. Método de desplazamiento de cationes por saturación con amonio a pH 7.
2. Método de suma de cationes determinados a pH 8.2, en el cual la acidez intercambiable ($\text{Al}^{+3} + \text{H}^{+}$) se suma a las bases; esta normalmente es mayor a la CIC determinada a pH 7, especialmente en suelos con arcillas 1:1, o ricos en materia orgánica, o con minerales amorfos en los que la CIC varía con el pH, no en suelos con montmorillonita u otros minerales de relación 2:1.
3. Método de Capacidad de Intercambio Catiónico efectiva (CICe), donde el pH del suelo no es controlado, y los cationes básicos se desplazan por amonio más Al^{+3} extractable desplazado por KCl. $\text{CICe} = \text{bases (pH no controlado)} + \text{Al}^{+3} \text{ extractado con KCl}$.

La importancia de la CIC radica en que con ella se calcula el porcentaje de saturación de bases o cantidad relativa de bases en el suelo para determinar su fertilidad.

$$\% \text{ Saturación de bases} = \frac{(\text{Ca} + \text{Mg} + \text{K} + \text{Na}) \text{ cmol.kg}^{-1}}{\text{CIC cmol.kg}^{-1}} \times 100$$

El pH medido en un suelo es producido por un grupo de condiciones químicas específicas, por tanto, la determinación del pH del suelo es una de las pruebas más importantes que pueden hacerse para diagnosticar problemas de crecimiento de las plantas. El H^{+} intercambiable es la fuente principal de H^{+} hasta que el pH del suelo llega a menos de 6, cuando el Al^{+3} de las láminas octaédricas de las arcillas se vuelve inestable y es adsorbido como Al^{+3} intercambiable. La influencia más grande del pH en el desarrollo de las plantas se efectúa en la disponibilidad de nutrientes ya que está relacionado con la saturación de bases. Cuando la saturación de bases es menor al 100%, un incremento en el pH va asociado con un aumento en las cantidades de Ca y Mg (Foth 1985).

Se ha comprobado que en algunos suelos el Al^{+3} intercambiable es el catión dominante asociado con la acidez del suelo. Por tanto en estos suelos la acidez intercambiable está formada por $\text{Al}^{+3} + \text{H}^+$ en diferentes proporciones. La acidez intercambiable en los suelos es el resultado de la presencia de hidrógeno (H^+) y Aluminio (Al^{+3}) que causan una disminución en el pH. La alta concentración de Al^{+3} genera toxicidad para las plantas, además de tener un efecto negativo sobre las propiedades químicas del suelo como solubilización, disponibilidad y absorción de nutrientes, físicas como estructura y estabilidad de agregados y biológicas como tipo de organismos presentes en el suelo, ocasionando así una reducción en el crecimiento de las raíces lo cual afecta en forma negativa el crecimiento del cultivo. También reduce la calidad de las cosechas e induce deficiencias nutricionales de: Ca, Mg, P, S y Zn entre otros, por lo cual es indispensable conocer la acidez intercambiable de los suelos y relacionarla con el pH, textura y materia orgánica entre otros (Fassbender 1975).

El factor más perjudicial para las plantas en suelos fuertemente ácidos es la toxicidad de Aluminio (Al^{+3}), particularmente cuando el pH es inferior a 5.0. La toxicidad del Al^{+3} también limita la degradación microbiana de la materia orgánica. El pH en el cual los niveles de Al^{+3} alcanzan valores perjudiciales depende tanto de la planta como de factores del suelo, como la mineralogía de las arcillas, el contenido de materia orgánica, la concentración de otros cationes y aniones y la salinidad total del suelo. En este caso la proporción de Al^{+3} en el complejo de cambio y en la solución del suelo, llega a concentraciones que producen síntomas característicos de acuerdo con las especies vegetales. Estos síntomas se parecen con frecuencia, a los problemas que se dan por deficiencias de P y Ca. Se sabe que las plantas jóvenes son particularmente sensitivas a la acidez (Fassbender 1987). El efecto neto de la hidrólisis por Al^{+3} intercambiable es un incremento en la concentración de H^+ de la solución de suelo, que resulta de la disociación de H^+ intercambiable (Foth 1985).

Las bases son los elementos que neutralizan las cargas negativas del suelo, y neutralizan la acidez del suelo. Estas son: Ca, Mg, K, y Na. El Na en exceso puede causar toxicidad. La CIC es igual a la sumatoria de las bases intercambiables + la acidez intercambiable ($\text{Al}^{+3} + \text{H}^+$) (Arévalo y Gauggel 2008).

El contenido mineral de los materiales de origen es de particular importancia en la determinación de los niveles de fertilidad en los suelos. La transformación de la roca madre produce cambios, pero siempre la naturaleza del material de origen influirá grandemente en las características del suelo (Cepeda 2007).

Rocas Ígneas: Se han formado a partir de un material preexistente (magma) que ha atravesado por una etapa de fusión a alta temperatura, se admite que las rocas ígneas se han formado por la solidificación (cristalización) de magmas cuyo origen se encuentra en el interior de la tierra, en la corteza o en la parte superior del manto (Mora y Valverde 2005).

Rocas intrusivas: Son aquellas que han alcanzado su solidificación a partir del magma, por enfriamiento de éste a determinada profundidad y rodeadas de algún tipo de rocas encajantes (Mora y Valverde 2005).

Riolitas: Ricas en cuarzo y sanidina (variedad de los feldespatos potásicos), además contienen algunas plagioclasas, muscovita y muy pocos minerales ferromagnésicos (anfíboles, piroxenos, biotita). Proviene de magmas ricos en SiO₂ (ácidos), muy viscosos y ricos en gases (Mora y Valverde 2005).

Andesitas: son de color gris y de textura porfírica, hipocristalinas, macizas o vacuolares y escoriáceas. El mineral predominante es la plagioclasa (oligoclasa, andesina) y los piroxenos (augita e hipersteno), además puede haber biotita, hornblenda y olivino (Mora y Valverde 2005).

Ignimbritas claras: Son de composición riolítica en algunos casos y en otros andesíticas. Generan suelos ricos en minerales arcillosos. Son suelos con rocas metamórficas, poco profundos, material de grano grueso y hay visibilidad de cuarzo. (Simons 1977). También se definen como depósitos piroclásticos generados por avalanchas calientes, provenientes de un vulcanismo fisural explosivo, generalmente ácido (riolítico, dacítico), adquieren formas columnares al diaclasarse verticalmente por enfriamiento (Mora y Valverde 2005).

Volcánicos: Las arcillas de los suelos derivados de materiales volcánicos suelen estar constituidas, en algunos casos, casi exclusivamente de coloides y minerales amorfos. Uno de los componentes principales de estos suelos es el alófono, silicato aluminico amorfo o casi amorfo, que contribuye en gran parte a las propiedades físico-químicas de los suelos (Rodríguez *et al.*, 1971). La carga variable derivada del material amorfo, Fe y Al orgánico complejo es alta en muchos de los andosoles (Sumner 1999).

Tobas y cenizas volcánicas: Depósitos piroclásticos subáreos, acumulados en frío y que según su granulometría pueden ser: cineríticos, lapílicos o blocosos. Su origen y aspecto pueden ser similares al de la ignimbrita y los aglomerados (Mora y Valverde 2005).

Aluvión: Sedimentos continentales y marinos recientes. Incluye depósitos piedemonte y terraza de grava, planicies de inundación y depósitos de cauce (Instituto geológico nacional 1991).

Para interpretar los resultados de los análisis de suelos se usa la proporción de cada base en relación a la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC). Los métodos de laboratorio determinan la CIC {acetato de amonio, sumatoria de cationes y acidez intercambiable (Boul *et al.* 2003)}. El análisis directo de la CIC genera un costo adicional al usuario del servicio, se han desarrollado métodos más rápidos y menos costosos para el análisis de suelos, uno de ellos es el Mehlich III que es una solución compleja para extraer todos los elementos disponibles en el suelo (Arévalo y Gauggel 2008).

Con este método no se determina la Capacidad de Intercambio Catiónico CIC lo que obliga a hacerlo por sumatoria de cationes, por esta razón el objetivo principal de este estudio fue determinar la relación existente entre la acidez intercambiable y el pH para estimar la CIC y los objetivos específicos fueron establecer una relación de acidez intercambiable (Al⁺³+H⁺) y la textura y entre la acidez intercambiable (Al⁺³+H⁺) y la materia orgánica.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 SELECCIÓN DE LAS MUESTRAS

Con los resultados de cerca de 5000 muestras llegadas al laboratorio de suelos entre 2007 y abril de 2009, se seleccionaron muestras con pH menor a 6.0 en las que se determinó textura, materia orgánica y pH. Dichas muestras se agruparon en rangos de pH (4 - 4.5), (4.5 - 5), (5 - 5.5), (5.5 - 6), dentro de cada rango se agruparon de nuevo por textura (franco arenoso, franco, franco arcillo arenoso, franco arcilloso y arcilloso,) y dentro de ellos por el porcentaje de materia orgánica (< 2), (2 - 4) y (> 4), bajo la hipótesis que la capacidad de intercambio catiónico (CIC) variaría en función del pH, contenido de materia orgánica y contenido de arcilla. De esta selección se obtuvieron 100 muestras con las que se trabajó.

2.2 CLASIFICACIÓN POR MATERIAL PARENTAL

Con las muestras seleccionadas se hizo una separación según su lugar de procedencia con ayuda de los mapas geológicos de Honduras (SERNA 1991), Nicaragua (INETER) y El Salvador (OEA 1974) (Anexos 12, 13 y 14, respectivamente), en las cuales se identificó cuatro grupos de material parental: Aluvión de cuaternario, volcánico, tobas y cenizas volcánicas e Ignimbritas claras (Cuadro 1). Se descartaron 11 muestras debido a que por su origen no fueron suficientes para someterlas a análisis estadístico.

Cuadro 1. Clasificación de las muestras por material parental y lugar de procedencia.

# Muestras	Material Parental	Lugar de procedencia
12	Aluvión del cuaternario	Marcovia, San José de la Landa, Santa Ana de Yusguare (Depto. Choluteca), San Ignacio, Zamorano (Depto. Francisco Morazán).
18	Volcánicos	Jalapa, Azacualpa, Estelí (Nicaragua), Xochicalí (El Salvador)
38	Ignimbritas claras (Riolitas y Andesitas)	Cantarranas, Guaimaca, Tatumbula, Azacualpa, Valle de Ángeles, Uyuca, (Depto. Francisco Morazán), San José del Potrero, La Libertad, (Depto. Comayagua)
15	Tobas y Cenizas volcánicas	Marcala (Depto. La Paz). Bella vista, Los Llanos, Loma Alta, Corquín (Depto. Copán).

2.3 ANÁLISIS DE LABORATORIO

En todas las muestras seleccionadas se determinó $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ (agua 1:1) con potenciómetro, pH_{KCl} con cloruro de potasio (KCl) 1N, porcentaje de materia orgánica por Walkley y Black, textura por Bouyoucos, acidez intercambiable ($\text{Al}^{+3}+\text{H}^+$), aluminio intercambiable (Al^{+3}) e hidrógeno intercambiable (H^+) por Bremmer y Mulyaney.

2.4 VARIABLES CALCULADAS

Se calculó la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) por sumatoria de bases más acidez intercambiable $\{\text{Ca} + \text{Mg} + \text{Na} + \text{K} + (\text{Al}^{+3}+\text{H}^+)\}$, Capacidad de Intercambio Catiónico efectiva (CICe) por sumatoria de bases más aluminio intercambiable ($\text{Ca} + \text{Mg} + \text{Na} + \text{K} + \text{Al}^{+3}$), porcentaje de Saturación de Aluminio (%SAI) = $\{(\text{Al}^{+3}+\text{H}^+) / \text{CIC}\} \times 100$

2.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Con los resultados obtenidos se realizaron correlaciones de Pearson y luego regresión entre las variables con alto grado de correlación para determinar la relación entre $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$, materia orgánica y textura, luego se hicieron correlaciones y regresiones entre las variables $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ y pH_{KCl} contra acidez intercambiable ($\text{Al}^{+3}+\text{H}^+$), aluminio intercambiable (Al^{+3}), hidrógeno intercambiable (H^+), Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC), Capacidad de Intercambio Catiónico efectiva (CICe) y saturación de aluminio (%SAI) utilizando el programa MINITAB® valor de $r \geq 0.600$ y $P \leq 0.05\%$.

3. RESULTADOS

3.1 RELACIONES DE LA ACIDEZ INTERCAMBIABLE

3.1.1 $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ y acidez intercambiable ($\text{Al}^{+3}+\text{H}^+$)

Se encontró una relación muy baja y negativa entre el $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ y acidez intercambiable ($\text{Al}^{+3}+\text{H}^+$) $r = (-0.566)$. A pH mayor de 5.5 la relación mejora ya que la acidez intercambiable ($\text{Al}^{+3}+\text{H}^+$) existente en el suelo es mínima. La relación se hace menor a medida que disminuye el pH (Figura 1).

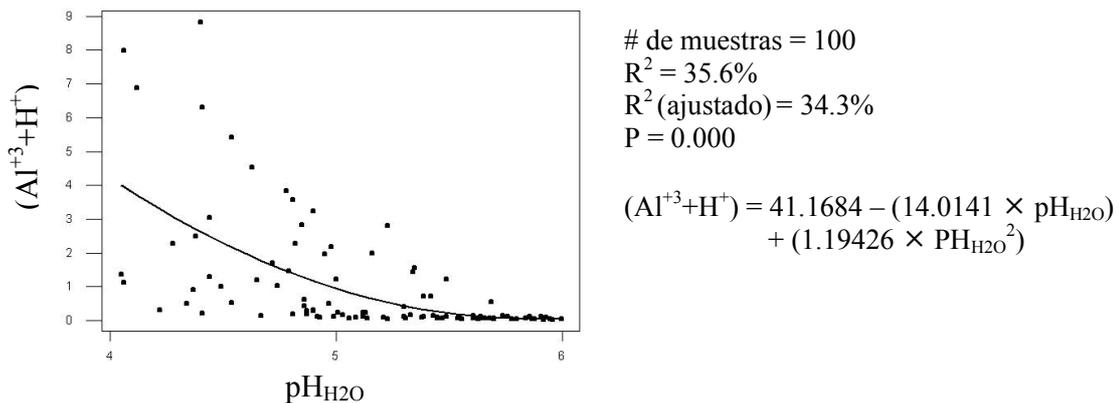


Figura 1. Relación entre $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ y acidez intercambiable ($\text{Al}^{+3}+\text{H}^+$) en suelos de la cuenca del Pacífico en El Salvador, Honduras y Nicaragua.

3.1.2 Contenido de arcilla y acidez intercambiable ($\text{Al}^{+3}+\text{H}^+$)

No se encontró relación entre el porcentaje de arcilla y la acidez intercambiable ($\text{Al}^{+3}+\text{H}^+$) ($r = 0.065$) debido a que existen diferentes tipos de arcillas con diferente Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC). Las arcillas pueden tener carga permanente y carga dependiente del pH por sustitución isomórfica, por lo cual la CIC del suelo va a depender del tipo de arcilla que presente; esto provoca que se comporten de manera diferente en cuanto a CIC, las arcillas 2:1 tienen alta y otras como las 1:1 tienen baja. Estas características van a depender del grado de meteorización del suelo (Sumner 1999). En suelos de coloides similares existe una correlación entre pH y porcentaje de saturación de las bases. Esta correlación directa no existe cuando se consideran suelos con una mineralogía de arcillas diferente (Fassbender y Bornemisza 1987). Para hacer un análisis directo con la arcilla se requiere conocer el tipo predominante en el suelo (Figura 2).

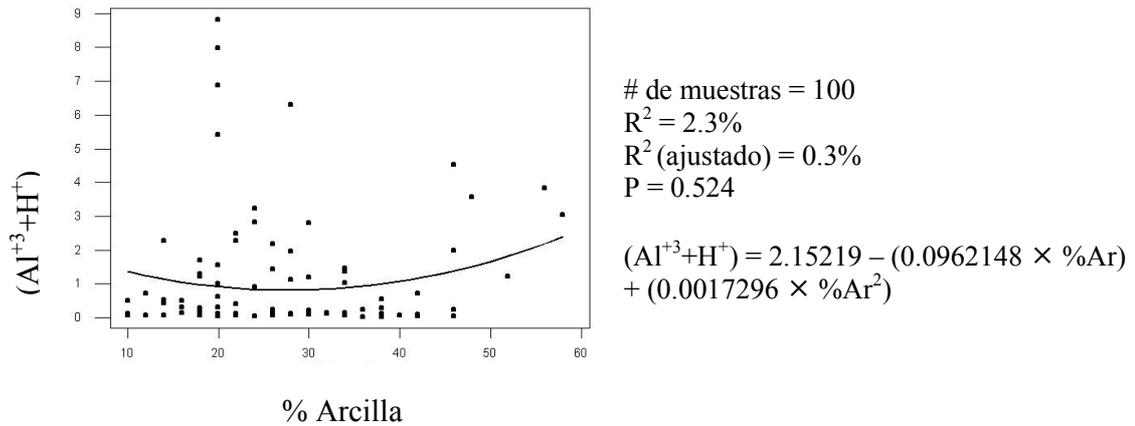


Figura 2. Relación entre el contenido de arcilla y acidez intercambiable ($Al^{+3}+H^+$) en suelos de la cuenca del Pacífico en El Salvador, Honduras y Nicaragua.

3.1.3 Contenido de materia orgánica y acidez intercambiable ($Al^{+3}+H^+$)

La relación entre el porcentaje de materia orgánica y la acidez intercambiable ($Al^{+3}+H^+$) fue también muy baja, ($r = 0.263$) e indica que no es posible inferir la acidez intercambiable ($Al^{+3}+H^+$) con el porcentaje de materia orgánica. (Figura 3). Esta baja relación se puede deber a que el ion de Al^{+3} comprende una parte mínima de la acidez total en muchos de los histosoles (suelos orgánicos), debido a que estos suelos son ricos en H^+ , pero contienen poco Al^{+3} , que es derivado de silicato. Los histosoles contienen minerales de sulfuro como FeS_2 que tienen un potencial de desarrollar acidez extrema bajo condiciones saturadas y anaerobias. Mucha de la acidez en suelos orgánicos es contribuida por los componentes humificantes, ácidos húmicos y fúlvicos (Bloom 1999).

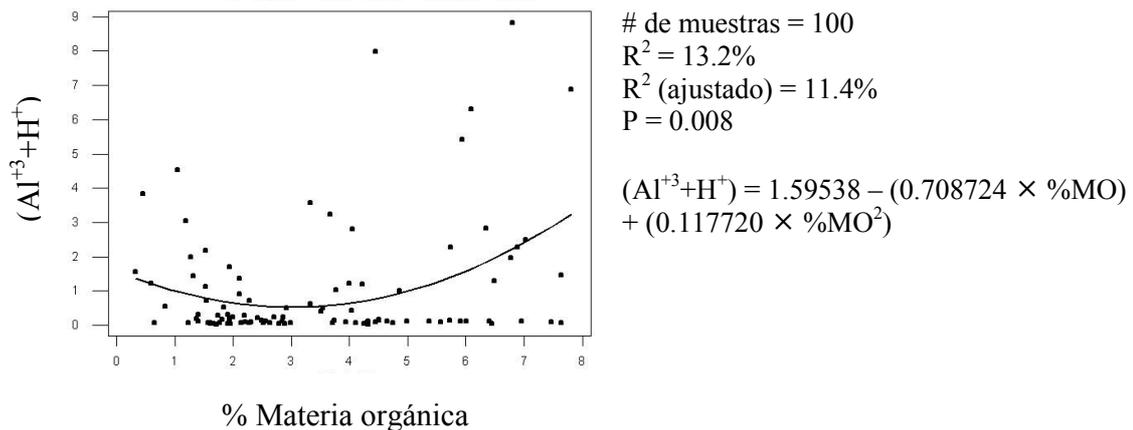


Figura 3. Relación entre el contenido de materia orgánica y acidez intercambiable ($Al^{+3}+H^+$) en suelos de la cuenca del Pacífico en El Salvador, Honduras y Nicaragua.

En suelos minerales ácidos muchos de los sitios $-\text{COOH}$ de la fracción orgánica son llenados con Al^{+3} . Sólo una pequeña parte de la materia orgánica está ligada al Al^{+3} que puede ser extraído con KCl 1M que la mayoría considera no intercambiable (Bloom 1996). El Al^{+3} en la materia orgánica es más débil que el H^+ (Sumner 1999).

3.2 INFLUENCIA DEL MATERIAL PARENTAL

El material parental del suelo tiene influencia en el contenido Al^{+3} , H^+ y acidez intercambiable ($\text{Al}^{+3}+\text{H}^+$). En los cuatro grupos de suelo estudiados se presentan correlaciones negativas, por lo que a mayor cantidad de acidez intercambiable ($\text{Al}^{+3}+\text{H}^+$) menor valor de pH se obtendrá (Cuadro 2). Esto muestra Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) dependiente del pH en todos los suelos estudiados pero en diferentes proporciones, lo que indica que tienen una constitución en su mineralogía de óxidos, hidróxidos, alófana o imogolita. Un mismo tipo de roca que evolucione bajo distintas condiciones de medio, puede dar lugar a suelos con distintas características, mientras que diferentes rocas bajo un mismo clima suficientemente energético y con una acción prolongada pueden dar lugar a suelos análogos (Porta *et al.* 1999).

No todos los suelos son iguales por su origen y por los elementos que contribuyen a la meteorización y su transformación. Esto dependerá de la zona, clima y temperatura del lugar donde se encuentre el suelo.

Cuadro 2. Correlación (r) entre el $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$, pH_{KCl} y aluminio intercambiable (Al^{+3}), hidrógeno intercambiable (H^+) y acidez intercambiable ($\text{Al}^{+3}+\text{H}^+$) en suelos de la cuenca del Pacífico en El Salvador, Honduras y Nicaragua.

Material parental	Al^{+3}		H^+		$(\text{Al}^{+3}+\text{H}^+)$	
	$\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$	pH_{KCl}	$\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$	pH_{KCl}	$\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$	pH_{KCl}
Aluvión	-0.779	-0.593	-0.787	-0.909	-0.882	-0.700
Volcánicos	-0.677	-0.827	-0.751	-0.924	-0.713	-0.873
Toba y cenizas volcánicas	-0.746	-0.758	-0.818	-0.863	-0.743	-0.759
Ignimbritas claras	-0.468	-0.552	-0.455	-0.583	-0.476	-0.570
Todos	-0.539	-0.663	-0.616	-0.769	-0.552	-0.682

Para determinar la acidez intercambiable ($\text{Al}^{+3}+\text{H}^+$) en suelos procedentes de aluviones, la mejor relación se dio con $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$, a diferencia de los suelos provenientes de material volcánico, y tobas y cenizas volcánicas, en los que la mejor relación se dio con pH_{KCl} , debido a que son suelos con materiales amorfos en los que la capacidad de intercambio catiónico (CIC) depende del pH. En suelos provenientes de ignimbritas claras no es posible determinar la acidez intercambiable con $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ ó pH_{KCl} , debido a que la relación para ambos casos es muy baja, y al usar todos los datos baja la relación (Cuadros 2 y 3).

Cuadro 3. Ecuaciones para la determinación de la acidez intercambiable ($Al^{+3}+H^+$) a partir de pH_{H_2O} y pH_{KCl} en suelos de la cuenca del Pacífico en El Salvador, Honduras y Nicaragua.

Material parental	Ecuación	R ² (%)
Aluvión del cuaternario	$(Al^{+3}+H^+) = (12.8822) - (4.54232 \times pH_{H_2O}) + (0.401089 \times pH_{H_2O}^2)$	85
Volcánico	$(Al^{+3}+H^+) = (15.3740) - (6.03671 \times pH_{KCl}) + (0.59428 \times pH_{KCl}^2)$	81
Tobas y cenizas volcánicas	$(Al^{+3}+H^+) = (85.3630) - (35.7001 \times pH_{KCl}) + (3.69536 \times pH_{KCl}^2)$	60
Ignimbritas claras	$(Al^{+3}+H^+) = (23.3391) - (9.35361 \times pH_{KCl}) + (0.939986 \times pH_{KCl}^2)$	39
Todos ☞	$(Al^{+3}+H^+) = (72.2120) - (30.5863 \times pH_{KCl}) + (3.23248 \times pH_{KCl}^2)$	67

☞: Ecuación utilizada para calcular la acidez intercambiable de todas las muestras, que posteriormente fue comparada con la acidez intercambiable determinada en el laboratorio.

Para determinar aluminio intercambiable (Al^{+3}) en suelos provenientes de aluviones, la mejor relación se dio con pH_{H_2O} a diferencia de los suelos provenientes de material volcánico, y tobas y cenizas volcánicas, en los que la mejor relación se dio con pH_{KCl} . En suelos provenientes de ignimbritas claras no es posible determinar aluminio intercambiable (Al^{+3}) con pH_{H_2O} ó pH_{KCl} , debido a que la relación para ambos casos es muy baja, esto puede ser debido a que las ignimbritas son andesitas formadas por plagioclasas y otros en los que por una alta presencia de bases (Ca, Mg, Na y K) no hay acidez intercambiable, y la que hay puede ser aportada por la materia orgánica a pesar de su bajo contenido (Cuadro 3 y 4).

Cuadro 4. Ecuaciones para la determinación del aluminio intercambiable (Al^{+3}) a partir de pH_{H_2O} y pH_{KCl} en suelos de la cuenca del Pacífico en El Salvador, Honduras y Nicaragua.

Material parental	Ecuación	R ² (%)
Aluvión del cuaternario	$Al^{+3} = (11.3950) - (4.06208 \times pH_{H_2O}) + (0.362519 \times pH_{H_2O}^2)$	81
Volcánico	$Al^{+3} = (11.7570) - (4.65814 \times pH_{KCl}) + (0.463563 \times pH_{KCl}^2)$	73
Tobas y cenizas volcánicas	$Al^{+3} = (93.1604) - (40.3765 \times pH_{KCl}) + (4.35938 \times pH_{KCl}^2)$	61
Ignimbritas claras	$Al^{+3} = (21.3252) - (8.64451 \times pH_{KCl}) + (0.878254 \times pH_{KCl}^2)$	38
Todos	$Al^{+3} = (68.2458) - (29.0766 \times pH_{KCl}) + (3.08931 \times pH_{KCl}^2)$	66

La mejor relación para la determinación del hidrógeno intercambiable (H^+) fue con pH_{KCl} para los suelos provenientes de aluviones, material volcánico y tobas y cenizas volcánicas. En suelos provenientes de ignimbritas claras no es posible determinar hidrógeno intercambiable (H^{+3}) con pH_{H_2O} ó pH_{KCl} , debido a que la relación para ambos casos es muy baja (Cuadro 5).

Cuadro 5. Ecuaciones para la determinación de hidrógeno intercambiable (H^+) a partir de pH_{H_2O} y pH_{KCl} en suelos de la cuenca del Pacífico en El Salvador, Honduras y Nicaragua.

Material parental	Ecuación	R² (%)
Aluvión del cuaternario	$H^+ = (2.23687) - (0.825572 \times pH_{KCl}) + (0.0758711 \times pH_{KCl}^2)$	87
Volcánico	$H^+ = (3.61695) - (1.37857 \times pH_{KCl}) + (0.130723 \times pH_{KCl}^2)$	89
Tobas y cenizas volcánicas	$H^+ = (8.03947) - (3.22859 \times pH_{KCl}) + (0.317419 \times pH_{KCl}^2)$	76
Ignimbritas claras	$H^+ = (2.01390) - (0.709097 \times pH_{KCl}) + (0.0617321 \times pH_{KCl}^2)$	35
Todos	$H^+ = (6.95762) - (2.84436 \times pH_{KCl}) + (0.29084 \times pH_{KCl}^2)$	72

Se encontró una relación positiva entre la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) tanto en función del pH_{H_2O} como en función del pH_{KCl} en suelos derivados de material volcánico, al igual que la Capacidad de Intercambio Catiónico efectiva (CICe) debido a que la CIC depende del pH por el tipo de arcillas. Los suelos provenientes de material aluvial, tobas y cenizas volcánicas e ignimbritas claras (riolitas y andesitas) no presentan buena relación entre Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC), Capacidad de Intercambio Catiónico efectiva (CICe) y pH_{H_2O} o pH_{KCl} . Esto puede ser debido a que la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) y saturación de bases de un suelo está afectado por el grado de meteorización que éste posea, grado de fertilización y equilibrio entre micelas cargadas negativamente y cationes cargados positivamente (bases) (Cepeda 2007). En suelos provenientes de material volcánico y tobas y cenizas volcánicas la mejor relación de saturación de aluminio (%SAl) se presenta con pH_{KCl} , esto indica que la acidez potencial está dada por el aluminio intercambiable (Al^{+3}) a diferencia de los suelos provenientes de material aluvión, los cuales presentan mejor relación con pH_{H_2O} , debido a que la acidez intercambiable ($Al^{+3}+H^+$) está más influenciada por el H^+ . Los suelos provenientes de ignimbritas claras no presentan buena relación entre saturación de aluminio (%SAl) y pH_{H_2O} o pH_{KCl} ya que por su origen mineralógico predominan las bases (Ca, Na, Mg, K) y no la acidez intercambiable ($Al^{+3}+H^+$) (Cuadro 6).

Cuadro 6. Correlación (r) entre $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$, pH_{KCl} y Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC), Capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICe) y saturación de aluminio (%) en suelos de la cuenca del Pacífico en El Salvador, Honduras y Nicaragua.

Material parental	CIC		CICe		%SAI	
	$\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$	pH_{KCl}	$\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$	pH_{KCl}	$\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$	pH_{KCl}
Aluvión	0.292	0.523	0.296	0.527	-0.819	-0.707
Volcánicos	0.636	0.628	0.640	0.635	-0.742	-0.883
Toba y cenizas volcánicas	-0.526	-0.321	-0.496	-0.287	-0.549	-0.657
Ignimbritas claras	0.169	0.320	0.177	0.329	-0.372	-0.483
Todos	0.241	0.263	0.259	0.285	-0.535	-0.689

3.3 DETERMINACIÓN DE LA ACIDEZ INTERCAMBIABLE ($\text{Al}^{+3}+\text{H}^{+}$) PARA CALCULAR CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO (CIC)

La fórmula utilizada para el cálculo de la acidez intercambiable fue:

$(\text{Al}^{+3}+\text{H}^{+}) = (72.2120) - (30.5863 \times \text{pH}_{\text{KCl}}) + (3.23248 \times \text{pH}_{\text{KCl}}^2)$ con la cual se determinó que los valores de acidez intercambiable ($\text{Al}^{+3}+\text{H}^{+}$) calculada comparados con los medidos en el laboratorio, fueron muy similares (Cuadro 7). Por lo que se puede utilizar valores de acidez intercambiable ($\text{Al}^{+3}+\text{H}^{+}$) para calcular la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) de: 3 cmol.kg^{-1} cuando el pH medido en agua del suelo está en el rango de 4 a 4.5, 1.3 cmol.kg^{-1} en pH de 4.5 a 5, 0.5 cmol.kg^{-1} en pH de 5 a 5.5, y 0.1 cmol.kg^{-1} en pH de 5.5 a 6, lo que nos indica que a medida aumenta el valor de acidez intercambiable ($\text{Al}^{+3}+\text{H}^{+}$), disminuye el $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$.

Cuadro 7. Acidez intercambiable ($\text{Al}^{+3}+\text{H}^{+}$) medida y calculada en cmol.kg^{-1} de suelo según la fórmula de regresión.

pH	Acidez intercambiable ($\text{Al}^{+3}+\text{H}^{+}$)		
	Medida	Calculada \approx	Recomendada ϵ
<4	nr	nr	nr
4-4.5	2,91	3,01	3.0
4.5-5	1,36	1,21	1.3
5-5.5	0,47	0,52	0.5
5.5-6	0,08	0,12	0.1
6 - 6.5	nr	nr	nr

nr: No realizado

\approx : Calculada con base en ecuación de todos los grupos cuya acidez intercambiable ($\text{Al}^{+3}+\text{H}^{+}$) se determinó en función de pH_{KCl} donde $(\text{Al}^{+3}+\text{H}^{+}) = (72.2120) - (30.5863 \times \text{pH}_{\text{KCl}}) + (3.23248 \times \text{pH}_{\text{KCl}}^2)$

ϵ : Recomendada con base en el promedio entre la acidez intercambiable ($\text{Al}^{+3}+\text{H}^{+}$) medida y la calculada en el laboratorio.

4. CONCLUSIONES

- Basado en la acidez intercambiable ($Al^{+3}+H^{+}$) determinada en el laboratorio y calculada con la ecuación $(Al^{+3}+H^{+}) = (72.2120) - (30.5863 \times pH_{KCl}) + (3.23248 \times pH_{KCl}^2)$ se pueden utilizar los valores de acidez intercambiable ($Al^{+3}+H^{+}$) para el cálculo de la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) de: 3 cmol.kg^{-1} cuando el pH medido en agua del suelo este en el rango de 4 a 4.5, 1.3 cmol.kg^{-1} en pH de 4.5 a 5, 0.5 cmol.kg^{-1} en pH de 5 a 5.5, 0.1 cmol.kg^{-1} en pH de 5.5 a 6 y 0 cmol.kg^{-1} en pH de 6 en adelante.
- No existe una relación directa entre pH y acidez intercambiable ($Al^{+3}+H^{+}$) sin tomar en cuenta el material parental del suelo, ya que el material parental tiene influencia sobre las características químicas del suelo.
- No hay una relación directa entre el porcentaje de arcilla y la acidez intercambiable ($Al^{+3}+H^{+}$).
- No se puede establecer una relación directa entre el porcentaje de materia orgánica y la acidez intercambiable ($Al^{+3}+H^{+}$).
- Los suelos estudiados de la cuenca del Pacífico presentan Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) variable dependiente del pH.
- En suelos derivados de ignimbritas claras no se encontró relación entre la acidez intercambiable ($Al^{+3}+H^{+}$) y el pH_{H_2O} o pH_{KCl} .
- En suelos de origen diferente al aluvial no existe una relación entre pH_{H_2O} y pH_{KCl} .
- A mayor diferencia entre pH_{H_2O} y pH_{KCl} indica mayor presencia de acidez intercambiable ($Al^{+3}+H^{+}$) en el suelo.

5. RECOMENDACIONES

- En la rutina del laboratorio de suelos de la Escuela Agrícola Panamericana cuando el $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ sea <5.3 se recomienda medirlo nuevamente en KCl en el caso de suelos de origen volcánico y de tobas y cenizas volcánicas para la determinación de la acidez potencial y calcular la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC).
- Para estimar la acidez intercambiable ($\text{Al}^{+3}+\text{H}^+$) en suelos procedentes de material parental de aluvión del centro y sur de Honduras, no medir el pH_{KCl} , ya que la mejor relación se presenta con $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$.
- Si no se determina directamente Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC), aluminio intercambiable (Al^{+3}) e hidrógeno intercambiable (H^+) se recomienda determinar pH_{KCl} si el pH es < 6 .

6. LITERATURA CITADA

Arévalo, G. E., Gauggel, C. A. 2008. Manual de prácticas. Curso de manejo de suelos y nutrición vegetal. Zamorano, Honduras. 3ra. Edición. Pág. 60

Bloom, P. 1999. Soil pH and pH buffering. In Hand book of soil science. Library of congress cataloging in publication data, United States of America. Pag. B-339

Bonnet, J. A. Edafología de los suelos salinos y sódicos. Río Piedras, Puerto Rico, Estación Exp. Agrícola, 1960. Pág. 337

Boul, S.W., Southard R. J., Graham R. C., Mc Daniel P. A. 2003. Soil Genesis and classification. Fifth Edron. Iowa State. Pág. 64

Bremmer, J. M., Mulyaney C.S. 1982. Nitrogen-total pp 525-622. In: A L. Page (ed). Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties. Second ed. Amer. Soc. Agr. Madison, Wisconsin.

Cepeda Dovala J. M. 2007. Química de suelos. Editorial Trillas, México. Pág. 15 y 106

Cortés, L.A. Malagón, C.D. 1984. Los levantamientos agrológicos y sus aplicaciones múltiples. Colombiana de impresos LTDA, Bogotá, Colombia. Pág. 267

Fassbender, H. W. 1975. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. San Jose, Costa Rica. 1ra. Edición. Talleres gráficos de Trejos Hnos. Sucs., S. A. Pág. 173, 183

Fassbender, H. W., Bornemisza, E. 1987. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. San José, Costa Rica. 2da edición. Talleres gráficos de Trejos Hnos. Sucs., S. A. Pág. 174

Foth, H.D. 1985. Fundamentos de la ciencia del suelo. México. Tercera edición. Talleres de la compañía editorial continental, S. A. de C. V. Pág. 207, 208, 211

Instituto Geográfico Nacional 1991. Mapa geológico de Honduras. Segunda edición. Escala 1:500000. Color

Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER). Mapa geológico del Pacífico de Nicaragua. Color

McLean, E. 1982. Soil pH and lime requirement pp. 199-223. In: A.L. Page (ed). Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties. Second ed. Amer. Soc. Madison, Wisconsin.

Mora C.S., Valverde G. R. 2005. Geología, Procesos de la dinámica interna y externa. Costa Rica. 2da edición. Editorial tecnológica de Costa Rica. Pág. 73, 78, 81, 83

Organización de Estados Americanos (OEA). 1974. Principales zonas de acuíferos de El Salvador. Color

Porta, M., López, A., Roquero, C. 1999. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Segunda edición. Grafo. S. A. España. Pag. 229

Rodríguez, P. C, Fernández, C. E, Borges, P. A. 1971. Mineralogía de arcillas y limos en algunos suelos volcánicos en algunos suelos volcánicos de Tenerife, Islas canarias. En línea. Consultado el 16 de julio de 2009. Disponible en:
<http://digital.csic.es/bitstream/10261/12421/2/ANEA-1971-30-1031.pdf>

S.A. Acidez del suelo. Consultado el 30 de Julio de 2008. En línea. Disponible en:
<http://www.fagro.edu.uy/~edafologia/curso/Material%20de%20lectura/TEORICOS/quimicas2.pdf>

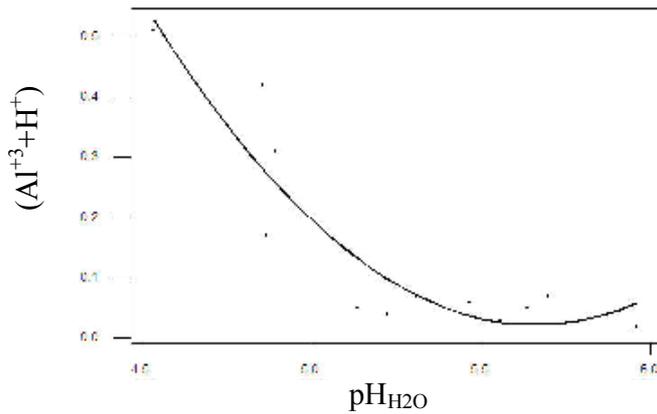
Secretaría de Recursos Naturales y Ambiente (SERNA). 1991. Mapa geológico de Honduras. IGN - InterAmerican Geodetic Survey. Escala 1:500,000. Color.

Simons, C. S. 1977. Informe al gobierno de Honduras sobre suelos de Honduras. La FAO, Tegucigalpa. Pág. 75

Sumner, M. E. 1999. Hand book of soil science. Library of congress cataloging in publication data, United States of America. Pag. B197, 204, E-219, E-341

7. ANEXOS

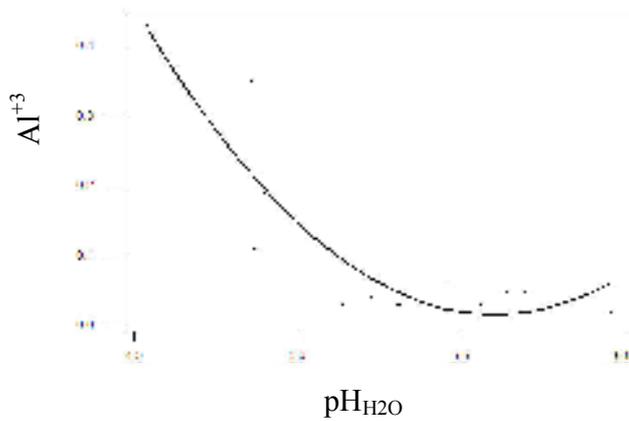
Anexo 1. Relación entre $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ y acidez intercambiable ($\text{Al}^{3+}+\text{H}^+$) en suelos del centro y sur de Honduras con procedencia de material parental aluvi3n.



de muestras = 12
 $R^2 = 85\%$
 R^2 (ajustado) = 81%
 $P = 0.004$

$$(\text{Al}^{3+} + \text{H}^+) = (12.8822) - (4.54232 \times \text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}) + (0.401089 \times \text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}^2)$$

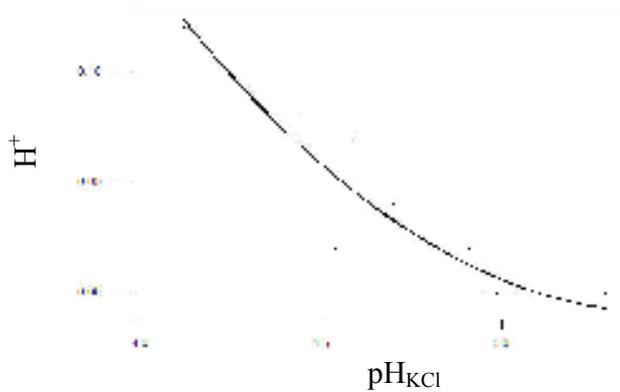
Anexo 2. Relaci3n entre $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ y aluminio intercambiable (Al^{3+}) en suelos del centro y sur de Honduras con procedencia de material parental aluvi3n.



de muestras = 12
 $R^2 = 77\%$
 R^2 (ajustado) = 74%
 $P = 0.012$

$$\text{Al}^{3+} = (11.3950) - (4.06208 \times \text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}) + (0.362519 \times \text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}^2)$$

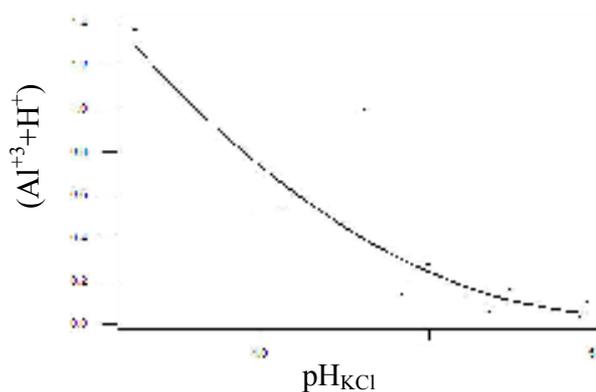
Anexo 3. Relación entre pH_{KCl} e hidrógeno intercambiable (H^+) en suelos del centro y sur de Honduras con procedencia de material parental aluvión.



de muestras = 12
 $R^2 = 87\%$
 $R^2(\text{ajustado}) = 85\%$
 $P = 0.000$

$$\text{H}^+ = (2.23687) - (0.825572 \times \text{pH}_{\text{KCl}}) + (0.0758711 \times \text{pH}_{\text{KCl}}^2)$$

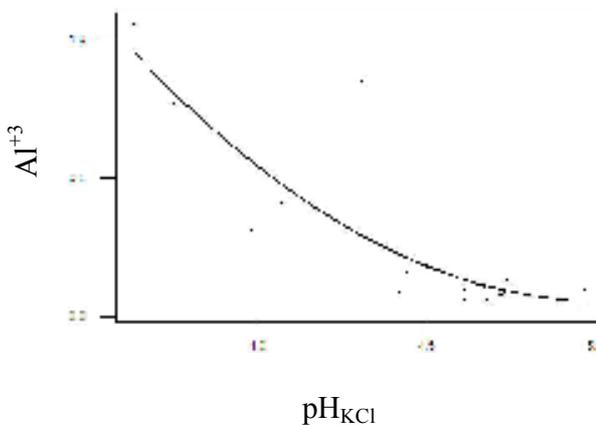
Anexo 4. Relación entre pH_{KCl} y acidez intercambiable ($\text{Al}^{+3} + \text{H}^+$) en suelos de Nicaragua y El Salvador con procedencia de material parental volcánico.



de muestras = 18
 $R^2 = 81.1\%$
 $R^2(\text{ajustado}) = 78.6\%$
 $P = 0.000$

$$(\text{Al}^{+3} + \text{H}^+) = (15.3740) - (6.03671 \times \text{pH}_{\text{KCl}}) + (0.594286 \times \text{pH}_{\text{KCl}}^2)$$

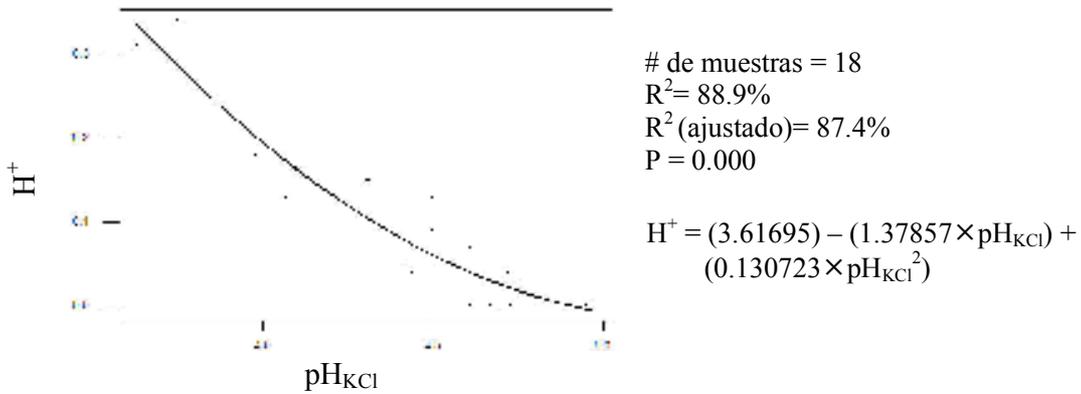
Anexo 5. Relación entre pH_{KCl} y aluminio intercambiable (Al^{+3}) en suelos agrícolas de Nicaragua y El Salvador con procedencia de material parental volcánico.



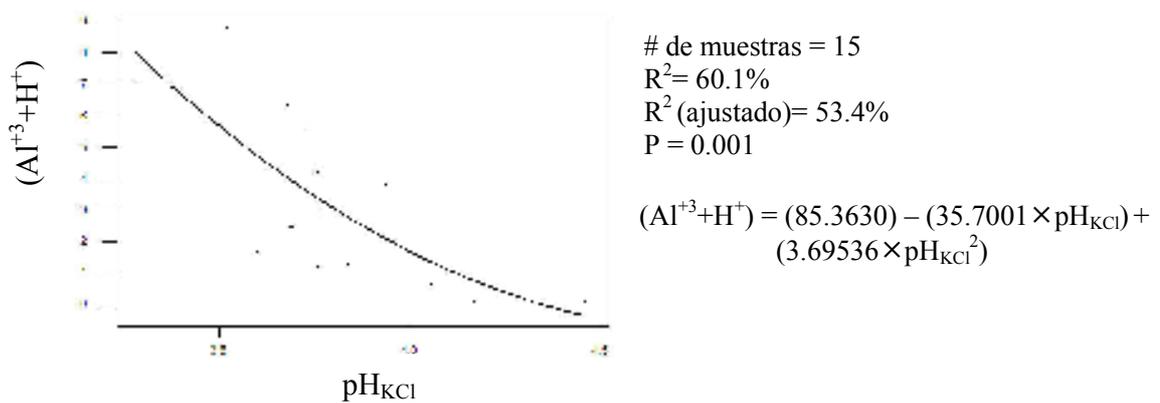
de muestras = 18
 $R^2 = 73.5\%$
 $R^2(\text{ajustado}) = 69.9\%$
 $P = 0.000$

$$\text{Al}^{+3} = (11.7570) - (4.65814 \times \text{pH}_{\text{KCl}}) + (0.463563 \times \text{pH}_{\text{KCl}}^2)$$

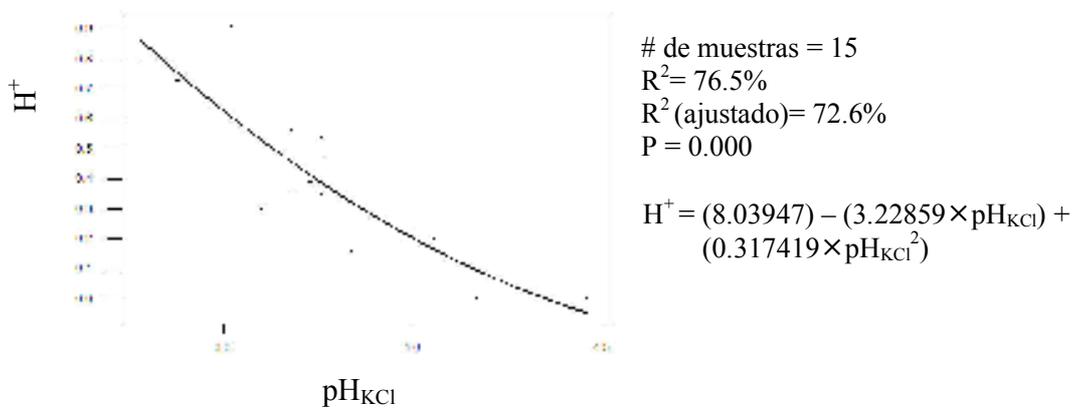
Anexo 6. Relación entre pH_{KCl} e hidrógeno intercambiable (H^+) en suelos de Nicaragua y El Salvador con procedencia de material parental volcánico.



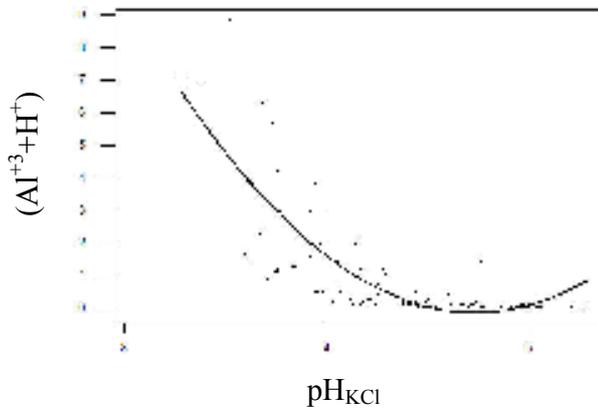
Anexo 7. Relación entre pH_{KCl} y acidez intercambiable ($\text{Al}^{+3} + \text{H}^+$) en suelos del centro y sur de Honduras con procedencia de material parental tobas y cenizas volcánicas.



Anexo 8. Relación entre pH_{KCl} e hidrógeno intercambiable (H^+) en suelos del centro y sur de Honduras con procedencia de material parental tobas y cenizas volcánicas.



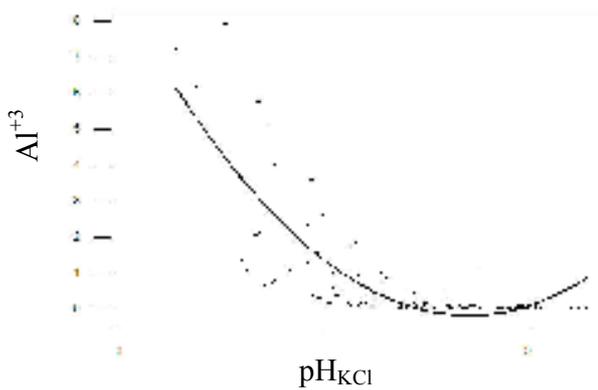
Anexo 9. Relación entre pH_{KCl} y acidez intercambiable ($\text{Al}^{+3}+\text{H}^+$) en suelos del centro y sur de Honduras de los cuatro grupos.



de muestras = 89
 $R^2 = 66.8\%$
 R^2 (ajustado) = 66%
 $P = 0.000$

$$(\text{Al}^{+3}+\text{H}^+) = (72.2120) - (30.5863 \times \text{pH}_{\text{KCl}}) + (3.23248 \times \text{pH}_{\text{KCl}}^2)$$

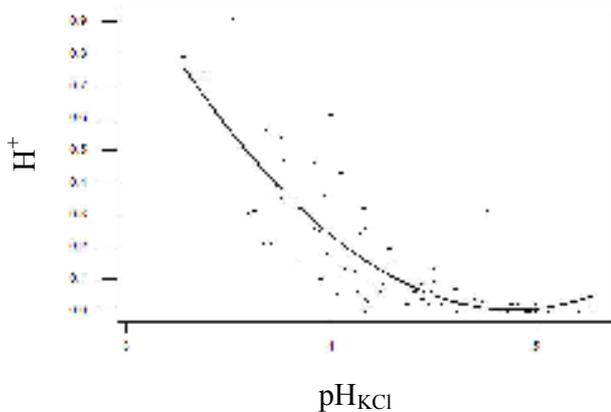
Anexo 10. Relación entre pH_{KCl} y aluminio intercambiable (Al^{+3}) en suelos del centro y sur de Honduras de los cuatro grupos.



de muestras = 89
 $R^2 = 66\%$
 R^2 (ajustado) = 65.2%
 $P = 0.000$

$$\text{Al}^{3+} = (68.2458) - (29.0766) \times (\text{pH}_{\text{KCl}}) + (3.08931 \times \text{pH}_{\text{KCl}}^2)$$

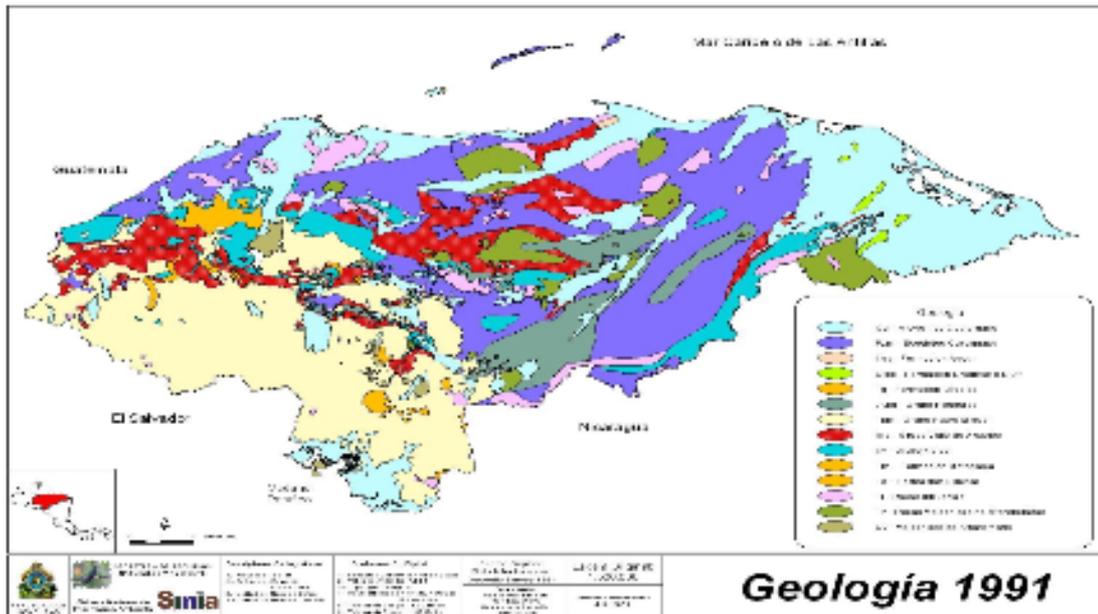
Anexo 11. Relación entre pH_{KCl} e hidrógeno intercambiable (Al^{+3}) en suelos del centro y sur de Honduras de los cuatro grupos.



de muestras = 89
 $R^2 = 72.1\%$
 R^2 (ajustado) = 71.4%
 $P = 0.000$

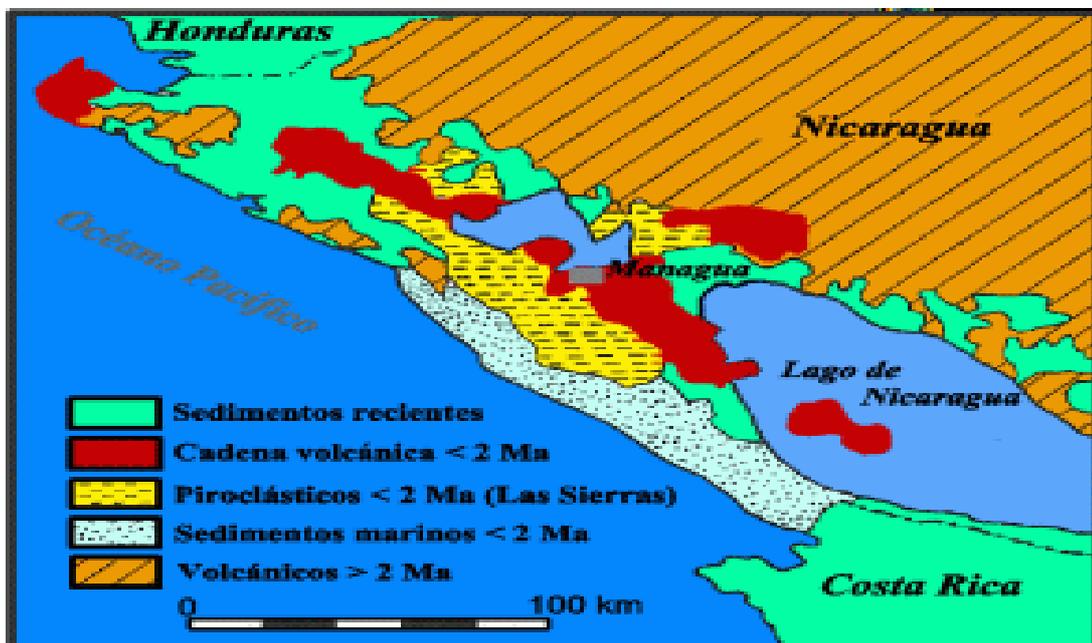
$$\text{H}^+ = (6.95762) - (2.84436 \times \text{pH}_{\text{KCl}}) + (0.29084 \times \text{pH}_{\text{KCl}}^2)$$

Anexo 12. Mapa geológico de Honduras



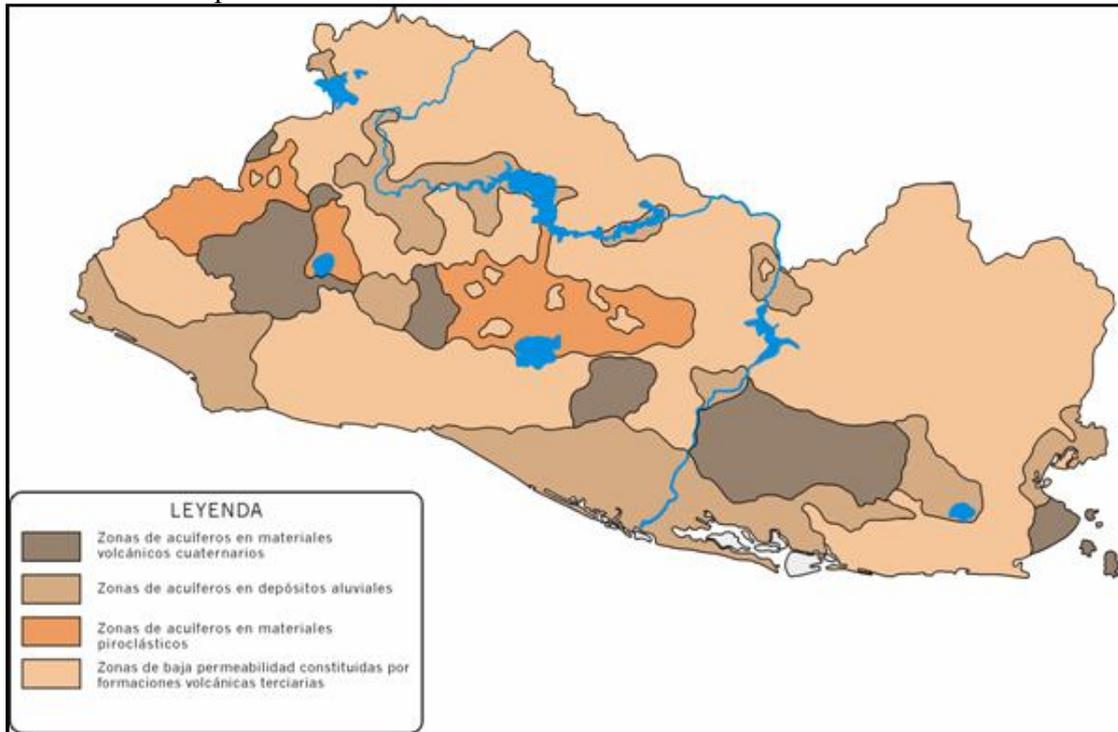
Fuente: SERNA 1991

Anexo 13. Mapa geológico de Nicaragua



Fuente: Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER)

Anexo 14. Principales zonas de acuíferos de El Salvador



Fuente: Organización de Estados Americanos (OEA) 1974