

Evaluación de indicadores de calidad de suelo con cobertura vegetal nativa tipo t'olar de cinco comunidades del altiplano xerofítico

Genaro Condori Choque^{1*}

¹Instituto Nacional de Innovación Agropecuaria y Forestal, Departamental Oruro.

Dirección: Calle Santa Cruz N° 345. Oruro, Bolivia

*e-mail: gencond@hotmail.com

Resumen

A objeto de determinar indicadores de calidad de suelos con cobertura vegetal nativa del género *Parastrephia* en zonas del altiplano boliviano, se ha evaluado suelos de diferentes ecosistemas áridos en base al análisis físico-químico de suelos. El análisis estadístico ha sido realizado por el método multivariante de componentes principales y la clasificación de las muestras de suelo mediante el análisis de conglomerados jerárquico. Para el contraste entre tratamientos se utilizó un diseño de bloques completos al azar. Los resultados permiten establecer tres componentes que explican el 83.18% de la variabilidad total entre condiciones de suelo. El primer componente principal (CP1) y segundo componente principal (CP2) explican el 43.54% y 24.04% respectivamente de la variación total. Las correlaciones obtenidas entre las variables y factores muestran que la CP1, está definida por la capacidad de intercambio catiónico, pH, calcio, potasio conductividad eléctrica y sodio, el fósforo y contenido de arena contribuyen en sentido opuesto, en cambio la CP2 está definida por el magnesio, materia orgánica y nitrógeno total y de manera opuesta el nitrito. Las magnitudes de las variables que contribuyen CP1 y CP2 determinan la diferenciación entre suelos de ecosistemas de las zonas en estudio, por lo tanto son indicadores de calidad del suelo con cobertura de vegetación nativa tipo t'olar. La capacidad de intercambio catiónico y materia orgánica son los más indicados para definir la calidad de suelo sin embargo no son prácticos, por lo tanto el pH y CE se constituyen como los indicadores más relevantes para evaluar suelos del altiplano en condiciones de ambientes áridos y semiáridos.

Palabras claves: Indicador, Suelo, Cobertura vegetal, árido, pH, CE, Componente principal.

Abstract

In order to determine indicators of soil quality with native vegetation of the genus *Parastrephia* in areas of the Bolivian Altiplano were examined for soils of arid ecosystems based on physico-chemical analysis of soils. Statistical analysis has been done by the principal components multivariate method and the classification of the soil by means of hierarchical cluster analysis samples. The contrast between treatments was a randomized complete block design. The results allow establishing three components that explain the 83.18% of the variability in total between soil conditions. The first principal component (PC1) and second principal component (PC2) explain the 43.54% and 24.04% respectively of the total variation. The correlations obtained between the variables and factors show that the CP1, is defined by the capacity of cation exchange cationic, pH, calcium, potassium, electrical conductivity and sodium, the phosphorus and sand content contribute in the opposite direction, The CP2 is defined by magnesium, organic matter and total nitrogen and opposite way nitrite. The magnitudes of the variables that contribute PC1 and PC2 determine the differentiation between soils of ecosystems in the study areas, therefore are indicators of soil quality with coverage of native vegetation type t'olar. The capacity of cationic exchange and organic matter they are most indicated to define the quality of soil nevertheless they are not practical, Therefore the pH and EC are considered the most relevant indicators to evaluate soils of the altiplano in conditions of arid and semiarid environments.

Keywords: Indicator, Soil, Vegetation cover, pH, EC, Principal Component.

Introducción

Los ecosistemas del altiplano localizados en la Provincia biogeográfica Puneña xerofítica albergan especies con características adaptadas a condiciones de vida muy duras en las que la rigurosidad del clima actúa como un agente de selección natural para el desarrollo de las especies vegetal y animal, según Triveli y Valdivia (2009), la Provincia biogeográfica Puneña se extiende, desde los 3.300 hasta los 4.300 m.s.n.m., ocupando una superficie del altiplano sur del Perú, Bolivia, norte de Chile y noroeste argentino. Presenta un clima frígido y seco, con escasa precipitación. En cuanto a la vegetación existe predominancia de arbustos de porte bajo, en las que se evidencia la presencia de distintas especies leñosas con resina, algunas cactáceas y muchas herbáceas.

La interacción entre la vegetación nativa, los diferentes organismos (fauna, microfauna) y los factores climáticos, influyen de manera directa en las características físico químicas del suelo, el cual se constituye como uno de los recursos más importantes para la vida en el planeta, pues es la base para las actividades agropecuarias y forestales. El desarrollo de la vegetación natural, la producción de alimentos, productos medicinales y otros servicios ecosistémicos como la regulación del clima y la formación de oxígeno, dependen del uso que se da a los suelos (Martin y Adad, 2006, citados por García 2012; FAO 2015).

Los suelos y la vegetación natural mantienen relaciones recíprocas por una interacción constante, ya que un suelo fértil que proporciona nutrientes favorece el crecimiento de las plantas, además el suelo funciona como un tanque de retención de agua y de sustrato para sus raíces. La vegetación a través de su follaje y biomasa aérea, ofrece cobertura y aporte de materia orgánica al suelo previniendo la degradación y desertificación de los mismos reduciendo la erosión hídrica y eólica (FAO 2015).

En este sentido un aspecto muy ligado al recurso suelo es su fertilidad, este concepto debe integrar atributos físicos, químicos y biológicos según Pieri (1989) y Etchevers (1999) citados por García *et al.* (2012). Asimismo la fertilidad está relacionada a la calidad, que en términos simples, es la capacidad que tiene el suelo para funcionar efectivamente tanto en el presente como en el futuro (Doran y Parkin, 1994; Larson y Pierce, 1994 citados por Campitelli 2010). La calidad del suelo puede ser medida a través de sus propiedades físicas, químicas y/o biológicas, lo cual hace que se las considere como indicadores perceptibles y cuantificables (Campitelli 2010; García *et al.* 2012).

La calidad de los suelos de las zonas del altiplano boliviano no han sido evaluadas desde el punto de vista de equilibrio y conservación, peor aún según Orsag (2009) existe una notable degradación por diferentes causas (extracción de la t'ola y yareta, ampliación de la frontera agrícola), que implica el deterioro de los suelos, con una inminente disminución de la cobertura vegetal, debido al uso inadecuado sin prácticas de conservación de suelos frágiles. Sin embargo pese a este embate externo a los ecosistemas naturales existe una interacción positiva entre suelo y vegetación nativa del tipo t'olar que ha sido considerada como estratégica para la conservación y recuperación de suelos, según Alzerreca *et al.* (2002) estas comunidades vegetales aportan materia orgánica y sirve como protector de la erosión hídrica y eólica, contribuyendo a mantener microclimas, al reducir la velocidad de los vientos, lo cual favorece al establecimiento y crecimiento de otras especies del estrato inferior y en casos extremos sirven como forraje complementario para el ganado camélido, y a la vez ofrecen protección para la fauna silvestre.

Los suelos de estos ecosistemas aún no perturbados por actividades antrópicas permanecen en una situación de equilibrio natural, motivo por el cual el presente estudio tiene por objeto

determinar los indicadores adecuados de calidad de suelo con cobertura vegetal tólar (género *Parastrephia*) de cuatro sectores del altiplano boliviano.

Materiales y métodos

Localización

El trabajo de investigación se ha realizado en

base a muestras de suelo de las Unidades Productivas de Conservación (UPC) de camélidos y pastos nativos que el Instituto Nacional de Innovación Agropecuaria y Forestal (INIAF) a través de la Dirección Nacional de Investigación y la Unidad de Recursos Genéticos ha implementado en distintas regiones del altiplano de Bolivia. Las características climáticas y altitudes de las UPC's son detalladas en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Características climáticas y altitud de las zonas de recolección de muestras

Comunidad	Municipio y Departamento	Coordenadas		Altitud (m.s.n.m.)	Temperatura media (oC)	Precipitación media (mm)
		Latitud sur	Longitud oeste			
Challacollo	Llica – Potosí	19°46'14.02"	68°21'40.29"	3693	8.8*	135.9*
Sajama	Curahuara de Carangas - Oruro	18°08'41.51"	68°57'51.70"	4245	5.3*	331.9*
Quetena Grande	San Pablo de Lípez – Potosí	22°16'46.94"	67°21'49.79"	4249	5.8*	294.6*
Rosario	San Agustín – Potosí	21°34'35.79"	67°17'3.34"	3837	7.7*	170.9*

* SENAMHI Est. Llica (1993-1998), Est. Sajama (1975-1985), Est. Sn Pablo de Lípez (2002 – 2013), Est. San Agustín (2003 – 2013).

Metodología

Considerando que existe una fuerte relación entre la vegetación y el suelo se ha adoptado para la recolección de datos la metodología basada en el muestreo estratificado según Mostacedo y Fredericksen (2000), que para el presente estudio se realizó en base a la clasificación biogeográfica de Navarro y Ferreira (2009). La estratificación en la región se realizó de acuerdo a la siguiente escala:

- Provincia biogeográfica: Puneña – xerofítica del altiplano
- Sector: 1. Sajama, 2. Intersalar de Uyuni, 3. Lípez Suroccidental y 4. Sector Potosino.
- Zona: Con fisiografía homogénea, para ello se localizó lugares con escasa pendiente y relieve similar con comunidades vegetales

donde existe predominancia de la especie del género *Parastrephia*.

Posteriormente se realizó la colecta de muestras aplicando la metodología de muestreo aleatorio simple, el cual se realizó a una profundidad aproximada de 20 a 40 cm recomendado para pastizales naturales o bosques naturales (Santos *et al.*, 2010).

Variables analizadas

Las variables analizadas en las muestras de suelo para las características físicas son: porcentaje de Arcilla (Ac), porcentaje de Limo (Li), porcentaje de Arena (Ao) y porcentaje de Grava (Gr). Para las características químicas se analizaron las siguientes variables: Conductividad eléctrica (CE) en dS/m, pH (medido en agua 1:5), Cationes de cambio en meq/100g como ser Calcio (Ca) Magnesio (Mg) Sodio (Na) y Potasio (K), Capacidad de Intercambio Catió-

nico (CIC), porcentaje de Materia Orgánica (MO), porcentaje de Nitrógeno Total (NT), Fosforo asimilable (P) en ppm, Nitrito (NO_2) en ppm y Amonio (NH_4) en ppm. Los análisis físicos químicos de suelos fueron realizados en la Unidad de Análisis y Calidad Ambiental del Instituto Boliviano de Ciencia y Tecnología Nuclear (IBTEN), para ello se ha empleado la siguiente metodología.

- Hidrómetro de Bouyoucos para la determinación textura del suelo.
- Potenciometría para el análisis de CE, pH en agua.
- Absorción atómica para el análisis de cationes de cambio del Ca y Mg.
- Emisión atómica para el análisis de cationes de cambio de Na y K.
- Volumetría para el análisis de la CIC.
- Método de Walkley Black para la determinación de la MO.
- Método de Kjeldahl para determinar el % de NT.
- Espectrofotometría UV – Visible para el P, NO_2 y NH_3 .

Para el análisis estadístico y comparación de medias se ha establecido como tratamiento a la estratificación de las zonas de acuerdo al mapa de clasificación biogeográfica de Navarro y Ferreira (2009) en la que cada zona con vegetación predominante es un tratamiento por tanto se tiene los siguientes tratamientos:

T1: Sector Sajama con vegetación predominante del genero *Parastrephia*

T2: Sector Intersalar de Uyuni (Llica) con vegetación predominante del genero *Parastrephia*.

T3: Sector Potosino (Z. Rosario) con vegetación predominante del genero *Parastrephia*

T4: Sector Lípez Suroccidental (Quetena) con vegetación predominante del genero *Parastrephia*.

Análisis estadístico

El análisis estadístico ha sido realizado a través del método multivariante de Componentes Principales (ACP) y la clasificación de las muestras de suelo mediante el Análisis de Conglomerados Jerárquico (ACJ) empleando como medida de disimilitud la distancia euclidiana y el método de Ward como algoritmo de ligamiento. Para el contraste entre tratamientos o suelos de cada región se utilizó un diseño de bloques completos al azar y las medias fueron comparadas bajo la metodología de Tukey. Las variables cuantitativas que se utilizaron para el ACP fueron aquellas que presentaron un coeficiente de variación superior al 20%. Debido a que esta medida de dispersión relativa define más intrínsecamente la magnitud de la variabilidad de los parámetros del suelo y facilita la comparación de la variabilidad de un mismo parámetro en los grupos de muestras o de parámetros analizados (Hidalgo 2003). La colecta de muestras de suelo se realizó entre los meses de febrero y marzo.

Resultados y discusión

El Análisis de Componentes Principales (ACP) permitió establecer el efecto de los factores externos como la vegetación nativa y el ambiente en las propiedades del suelo. Son tres componentes que explican el 83.18% de la variabilidad total entre condiciones de suelo de las distintas regiones en las cuales se localizan la UPC's (Cuadro 2) destacándose el primer (CP1) y segundo componente (CP2) con un aporte del 43.54% y 24.04% respectivamente.

Cuadro 2. Valores propios y proporción de la varianza explicada por CP

	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6
Valor propio	6.96	3.84	2.49	0.96	0.50	0.42
Variabilidad (%)	43.54	24.04	15.59	6.05	3.18	2.64
Porcentaje acumulado (%)	43.54	67.59	83.18	89.24	92.42	95.06

Las correlaciones obtenidas entre las variables analizadas y los factores muestran que la CP1, está definida por las variables CIC, pH, Ca, K, CE y Na por orden de contribución en función a una moderada a alta correlación con el CP1, también contribuyen aunque en sentido opuesto, las variables P y Ao (Cuadro 3). De acuerdo a la Figura 1, se observa que las primeras variables forman un grupo que se localizan en el Cuadrante II y III y están muy relacionados con los cationes de cambio tales como el Ca, K y Na que intervienen en la CIC, por tanto en la fertilidad del suelo. El pH y CE que forman parte de este grupo están relacionados con la reacción del suelo. El grupo conformado por la variable P y Ao, localizados en el Cuadrante IV, están relacionados con la disponibilidad de nutriente para la planta y propiedad física del suelo respectivamente.

De acuerdo al Cuadro 3, la CP2 está definida por las variables Mg, MO y NT y de manera opuesta la variable NO_2 , se observa en la Figura 1, que la MO y NT conforman un grupo localizado en el Cuadrante I, las dos variables están relacionados a la fertilidad actual y potencial de los elementos del suelo ya sean orgánicos e inorgánicos. La variable NO_2 y Gr conforman un grupo localizado en el Cuadrante III, los mismos están relacionados con la disponibilidad de nutrientes para la planta y propiedad física del suelo (Figura 1).

En el Cuadrante II de la Figura 1, se observa otro grupo de variables relacionado a elementos que intervienen en el crecimiento de la planta como el Mg y NH_4 y variables relacionadas a la propiedad física del suelo como la Ac y Li.

Cuadro 3. Correlaciones entre las variables y los factores

Variables	CE	pH	Ca	Mg	Na	K	CIC	MO	NT	P	NH_4	NO_2	Gr	Ao	Ac	Li
F1	0.81	0.92	0.88	0.44	0.64	0.88	0.96	-0.30	-0.29	-0.80	0.31	0.54	0.08	-0.72	0.47	0.59
F2	-0.20	-0.12	-0.38	0.81	0.21	0.07	-0.13	0.82	0.86	-0.06	0.36	-0.61	-0.47	-0.58	0.47	0.42

Una de las variables que mayor contribución presenta al CP1 es la CIC y está estrechamente relacionado con la fertilidad del suelo, según Garrido (1994), es la capacidad del suelo que permite retener los elementos necesarios para nutrir a las plantas, que de otra forma estarían en la solución del suelo para su lixiviado, cuanto mayor sea esta capacidad mayor será la fertilidad natural del suelo, por tanto si se observa la Figura 1, los suelos de las zonas de Rosario y Llica están

estrechamente relacionados a la CIC y a la comparación de medias presentan una mayor fertilidad que el resto de los tratamientos con un valor de 17.62 y 17.46 meq/100g, respectivamente, ($P < 0.05$) (Cuadro 4), sin embargo de acuerdo al mismo autor valores de CIC en un rango de 10 a 20 meq/100 g. corresponden a suelos pobres con un bajo nivel de fertilidad. En cambio según Rioja (2002) citado por Pavon (2003) considera como un nivel de fertilidad medio.

Cuadro 4. Valores promedios de variables analizadas

Región	CE	pH	Ca	Mg	Na	K	CIC	MO	N
Rosario	0.2 a	8.66 a	12.95 b	2.16 b	1.36 a	1.13 a	17.62 a	0.32 b	0.052 bc
Llica	0.11 b	8.49 a	15.44 a	0.74 c	0.22 b	1.05 a	17.46 a	0.25 b	0.04 c
Quetena	0.04 c	7.94 b	7.6 c	3.46 a	0.19 b	0.93 a	12.19 b	1.2 a	0.09 a
Sajama	0.03 c	6.19 c	1.87 d	0.46 c	0.07 b	0.22 b	2.63 c	0.71 ab	0.068 ab

Letras distintas indican diferencias significativas ($P < 0.05$), test de Tukey

Continuación... Cuadro 4

Región	P	NH ₄	NO ₂	Gr	Ao	Ac	Li
Rosario	6.92 b	3.05 a	0.021 ab	4.04 b	53.2 c	19.2 b	27.6 a
Llica	7.22 b	1.7 a	0.032 a	21.3 a	68.8 ab	22.4 b	8.8 b
Quetena	6.47 b	3.33 a	0.007 bc	11.88 b	55.6 bc	29.2 a	15.2 ab
Sajama	45.76 a	1.45 a	0.006 c	6.84 b	75.2 a	14.2 c	10.6 b

Letras distintas indican diferencias significativas ($P < 0.05$), test de Tukey

Otra de las variables que mayor contribución tiene a la CP1 es el pH, definido como una propiedad química del suelo que tiene un efecto importante en el desarrollo de los seres vivos pues no solo define las propiedades físicas, químicas sino también biológicas de un suelo. El grado de acidez o alcalinidad es determinado por la lectura de pH que se da en la interfase líquida del suelo, por la interacción de los componentes sólidos y líquidos (Fernández *et al.*, 2006). Los suelos de Rosario y Llica presentan valores de 8,66 y 8,49 respectivamente (Cuadro 4) considerado según Rioja (2002) citado por Pavon (2003) como suelos ligeramente alcalinos, el suelo de Sajama es ligeramente ácido y el de Quetena es moderadamente básico.

Al análisis de la Figura 1 y el Cuadro 5, se observa que la CIC presenta una correlación moderada baja con el contenido de Ac y MO, este re-

sultado difiere al reporte de López *et al.*, (2003), quienes de manera lógica establecen en un suelo de desierto de México, que a medida que la CIC aumenta existe mayor componente de Arcilla y por otro lado Garrido (1994) asevera que la MO tiene una elevada CIC, quiere decir una mayor capacidad de retención catiónica del suelo. La CIC es la cuantificación de la capacidad del suelo de retener cationes pues la carga neta de un coloide es negativa, según el Cuadro 5 y la Figura 1 existe una alta correlación positiva con los cationes Ca y K, significa que estas cargas negativas están ocupadas por estos cationes en mayor proporción y esto es confirmado por el pH que para los suelos de Rosario y Llica alcanzan niveles de alcalinidad, al no contar con MO suficiente la estructura de estos suelos son poco aptos para la agricultura y muy susceptibles a la erosión (Garrido 1994).

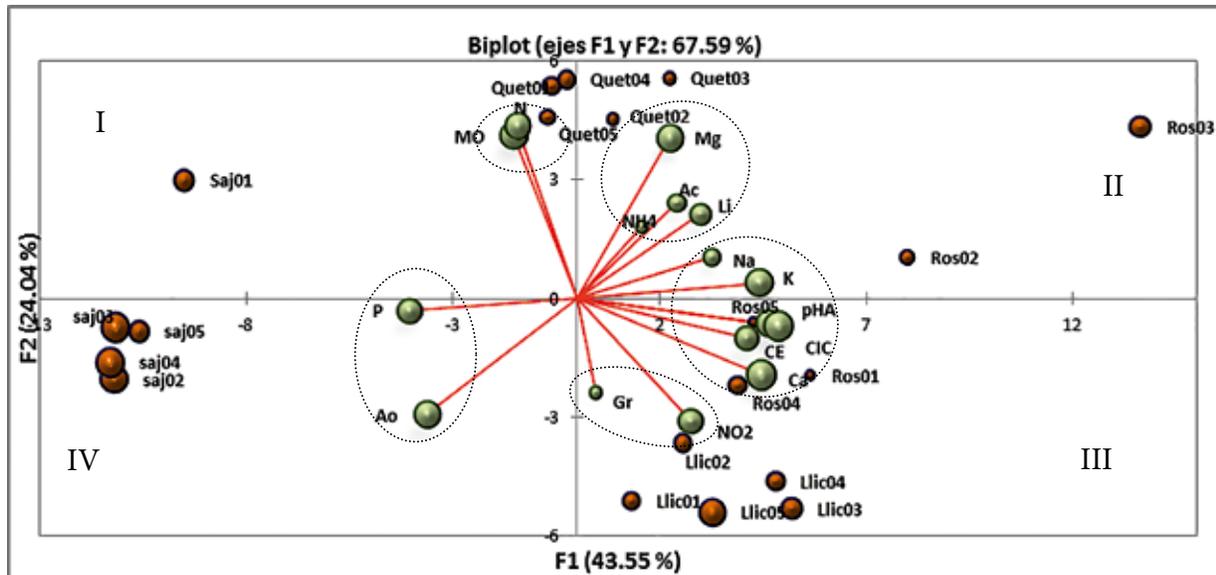


Figura 1. Distribución de los tratamientos según el análisis físico químico de suelos y su relación con las variables

La variable Ca que contribuye en mayor medida a la CP1, es un catión de cambio que forma parte de los principales elementos de cambio de la CIC, que en la medida de encontrarse en mayor o menor proporción en el coloide arcilloso influyen en el crecimiento de la vegetación nativa. Normalmente es el catión mayoritario entre

las bases intercambiables. Este elemento se encuentra en mayor proporción en los suelos de Llica con un nivel de 15,44 meq/100g. (Cuadro 4), este valor es considerado alto según Rioja (2002) citado por Pavon (2003), los niveles más bajos en Ca son los suelos de Quetena con un nivel de 7,6 meq/100g. (Cuadro 4).

Cuadro 5. Matriz de correlación (Pearson)

Variables	CE	pH	Ca	Mg	Na	K	CIC	MO	NT	P	NH ₄	NO ₂	Gr	Ao	Ac	Li
CE	1.00															
pH	0.69	1.00														
Ca	0.73	0.88	1.00													
Mg	0.07	0.40	0.09	1.00												
Na	0.77	0.45	0.40	0.28	1.00											
K	0.65	0.82	0.77	0.43	0.54	1.00										
CIC	0.76	0.93	0.96	0.34	0.54	0.86	1.00									
MO	-0.49	-0.33	-0.49	0.53	-0.19	-0.12	-0.34	1.00								
NT	-0.45	-0.35	-0.51	0.57	-0.05	-0.14	-0.34	0.96	1.00							
P	-0.47	-0.85	-0.73	-0.53	-0.31	-0.73	-0.80	0.12	0.13	1.00						
NH ₄	0.21	0.15	0.12	0.46	0.11	0.16	0.21	0.20	0.11	-0.23	1.00					
NO ₂	0.55	0.57	0.77	-0.26	0.10	0.35	0.63	-0.52	-0.61	-0.38	0.10	1.00				
Gr	-0.23	0.22	0.39	-0.18	-0.48	0.18	0.25	-0.23	-0.31	-0.26	-0.03	0.37	1.00			
Ao	-0.52	-0.52	-0.38	-0.74	-0.68	-0.64	-0.59	-0.15	-0.21	0.48	-0.45	-0.03	0.31	1.00		
Ac	-0.07	0.51	0.34	0.77	-0.01	0.53	0.47	0.39	0.35	-0.68	0.21	0.05	0.26	-0.55	1.00	
Li	0.66	0.33	0.26	0.45	0.82	0.46	0.43	-0.04	0.06	-0.19	0.41	0.01	-0.51	-0.88	0.08	1.00

Estos resultados coincide con López *et al.*, (2003), quienes aseguran que los suelos de las regiones áridas y semiáridas el carbonato de Ca es un componente abundante.

Otra de las variables importantes para la CP1 es el K que forma parte del grupo importante de cationes de cambio, la cantidad de K disponible en un suelo depende de la cantidad y tipo de minerales potásicos y condiciones ambientales durante la formación del suelo. El K intercambiable se encuentra retenido en las arcillas principalmente en forma electrostática neutralizando las cargas negativas que resultan de las sustituciones en su estructura (Vidal 2003). Los valores de K en tres tratamientos presentan un rango de 0.93 a 1.13 meq/100g (Cuadro 4), que es considerado como normal a alto en cambio en el tratamiento de la localidad de Sajama el valor promedio es 0.22 meq/100g, considerado como un nivel muy bajo según Rioja (2002) citado por Pavon (2003).

Todos los suelos contienen por lo menos pequeñas cantidades de sales solubles, los mismos son medidos a través de la conductividad eléctrica (CE) del suelo y permite estimar la cantidad de sales que contiene una muestra. La CE está influenciada por una combinación de propiedades físico-químicas del suelo, como la textura, el contenido de materia orgánica, humedad del suelo, capacidad de intercambio catiónico, salinidad, pH, Ca y Mg, tipos de suelo, entre otras. (Santibañez 2005; Simón 2013). La CE que presenta en Rosario alcanza un valor de 0.2 dS/m (Cuadro 4), el más alto del grupo de tratamientos el cual es considerado por Rioja (2002) citado por Pavon (2003), como inapreciable y que la mayoría de las plantas pueden tolerar este nivel de salinidad.

La variable Na también contribuye al CP1, siendo la química del Na muy similar a la del K pero su comportamiento en el suelo es diferente, los iones de Na liberados en la solución suelo, no experimentan fijación de ninguna clase y son retenidos por los puntos de intercambio catiónico con menor fuerza que los de K, Mg o Ca. Por tanto el Na es el catión que se lava con mayor facilidad

(Thompson y Troeh 2002). El Na es abundante en la naturaleza y al igual que los otros elementos del grupo de cationes nunca se encuentra en el estado elemental porque tiene una reacción rápida con los no metales (Lastra 2010). Los valores de Na en la comunidad de Rosario alcanzan valores de 1.36 meq/100g (Cuadro 4), según Rioja (2002), citado por Pavon (2003) considera este valor como un nivel alto de Na, en cambio los valores de los demás tratamientos oscila en un rango de 0.07 a 0.22 meq/100g considerados por el mismo autor como bajo a muy bajo.

Otro de los elementos macronutrientes que contribuye de manera opuesta al CP1 es el P cuya naturaleza hace que se lo considere como un elemento que forma parte de los minerales, microorganismos del suelo y de los compuestos orgánicos. En la solución suelo el P es fijado en el complejo arcillo húmico por tanto es cambiante o lábil, asimismo forma compuestos débilmente solubles con cationes divalentes y monovalentes, sin embargo la cantidad de P en la solución suelo es muy pequeña y la vegetación nativa aprovecha esta pequeña cantidad que se encuentra en equilibrio con el P de la fase sólida o mineral (Rojas 2009). En los suelos de Sajama se tienen las mayores concentraciones con un valor de 45,76 ppm (Cuadro 4) considerado como muy alto. Por otro lado el pH en las muestras de Sajama es ligeramente ácido (Rioja 2002 citado por Pavon 2003), lo cual coincide con Martini (1969) quien asegura que cuanto más bajo el pH o mayor acidez cambiante, mayor es la capacidad del suelo para fijar los fosfatos. Asimismo los suelos derivados de cenizas volcánicas, andosoles maduros tienden a fijar más P en la superficie de los minerales amorfos (Martini 1969; Espinosa 2006). En el resto de las muestras el valor del P oscila en un rango de 6,47 a 7,22 ppm (Cuadro 4), considerado como un nivel bajo según Rioja (2002) citado por Pavon (2003). Debido a que la contribución es opuesta, la correlación es inversamente proporcional con las variables Ac, Ca, K, CIC y pH (Cuadro 5).

La variable que mayor aporte presenta al CP2 es el Mg, el cual se encuentra en el suelo en un estado intercambiable, útil para las plantas debido a que es una fracción adsorbida a las partículas de arcilla y materia orgánica (COMPO 2013). Los valores más altos de Mg se encuentran en las muestras de suelo de la comunidad de Quetena (3.46 meq/100g) (Cuadro 4), este valor es considerado como alto según Rioja (2002), citado por Pavon (2003).

Otra de las variables que aporta a la CP2 es la MO, que juega un rol importante en la formación y estabilidad de la estructura del suelo, y tiene un fuerte impacto en la infiltración de agua, así como en el desarrollo de raíces y resistencia a la erosión (Zagal et al., 2002). La presencia de MO en los suelos estudiados de manera general muestra niveles bajos, según el Cuadro 4, los suelos de Quetena presentan el valor promedio más alto con 1,2%, según Rioja (2002), citado por Pavon (2003) este valor es considerado como bajo. Los resultados coinciden con datos de López et al. (2003) quienes reportan valores bajos de MO para suelos de desierto de México, lo cual es típico en ambientes áridos, debido a las bajas precipitaciones lo que ocasiona un déficit hídrico para las plantas inhibiendo su desarrollo e impidiendo la finalización de su ciclo de vida y su incorporación natural al sistema del suelo pues la fuente principal de MO proviene de la descomposición de seres vivos, actividad biológica de microorganismos y descomposición de restos y residuos metabólicos.

Un nutriente esencial para los organismos vivos al margen del P, K, y Ca y que influye en el CP2, es el elemento nitrógeno (NT), es uno de los

constituyentes principales de compuestos vitales como aminoácidos, proteínas, enzimas, nucleoproteínas, ácidos nucleicos, paredes celulares, clorofila etc. sobre la cual se basa la vida (Palma y Segat 2000; Fernández *et al.*, 2006; Perdomo y Barbazan 2001). El nitrógeno presente en el suelo bajo formas orgánicas no está disponible para las plantas, debe pasar a formas inorgánicas para ser adsorbido, sin embargo existe siempre una estrecha asociación entre los contenidos de materia orgánica del suelo y de NT (Perdomo y Barbazan 2001). Los suelos de la comunidad de Quetena y Sajama presentan los valores más altos de NT (0.09 y 0.068 % respectivamente) (Cuadro 4), los cuales corresponden a una categoría de suelos medianamente pobres según Fernández *et al.*, (2006); López *et al.*, (2003).

Existe el aporte de la variable Ao a la CP1 y CP2, el cual presenta correlaciones negativas con las variables Mg, Na, K y Li y una correlación negativa muy leve con la Ac. lo que indica es que los cationes de cambio mencionados se encuentran en menor cantidad en las muestra de suelo con mayor proporción de Ao. Este resultado es similar al análisis realizado por Andrades y Martínez (2014) quienes establecen que los suelos arenosos presentan una baja CIC (15 meq/100g) por lo tanto baja capacidad de retener cationes de cambio debido a que estos suelos tienen escasos coloides al no tener arcillas en su composición. En general los suelos de las muestras presentan una textura promedio Franco arcillo arenoso.

El análisis de conglomerados con base en el análisis de componentes principales confirma la diferenciación de condiciones de suelo en 4 grupos. Los cuales se aprecian en la Figura 4.

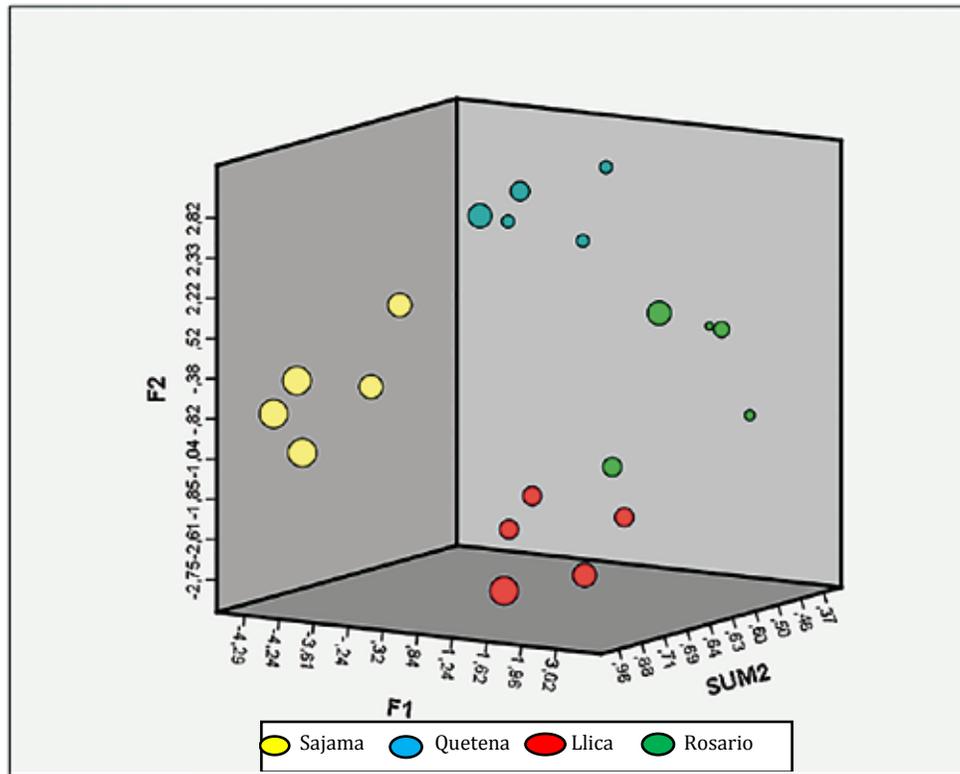


Figura 4. Distribución espacial de las comunidades según el análisis de suelos

Los criterios de determinación de los indicadores de la calidad de suelo, se basaron en los resultados del grado de asociación entre los factores y las variables, para el cual se tomó en cuenta el peso estadístico en la explicación de la variabilidad (valor del autovector), correlaciones con otras variables que presenten desde moderadamente alta a alta ($r = 0.6$ a 1 , ya sean positivas o negativas), facilidad y simplicidad en la medición (Campitelli *et al.*, 2010). En base a estos aspectos se han seleccionado las siguientes variables:

De acuerdo al Cuadro 6, la CIC tiene el valor más alto de correlación con la CP1 (0.96) y está correlacionado con 6 variables (Cuadro 4), sin embargo su medición requiere tomar muestras de suelo y realizar el análisis correspondiente. En segundo lugar se encuentra la variable pH, tiene un alto valor de correlación con la CP1 (0.92) y está correlacionado con 5 variables y su medición es simple, en tercer lugar se encuentra el K con una correlación de 0.88 con la CP1

y está correlacionado con 6 variables y su estimación es difícil. En cuarto lugar se encuentra la variable Ca, presenta una correlación de 0.88 con la CP1, esta correlacionado con 5 variables y su determinación es a través de muestras de suelo. En quinto lugar se encuentra la CE que presenta una correlación de 0.81 con la CP1 y esta correlacionado con 6 variables y su determinación es simple y finalmente el P que presenta una correlación negativa con la CP1, y esta correlacionado con 5 variables y su determinación es a través de análisis de suelo en laboratorio.

Lógicamente las variables con mayor correlación con la CP1 y CP2 son las más apropiadas para ser utilizados como indicadores de la calidad de suelo sin embargo no son prácticos al momento de la medición, por tanto desde un punto de vista de contribución a la CP1 y CP2 y considerando la facilidad y simplicidad de la medición se seleccionan a las variables pH y CE como indicadores de la calidad de suelos áridos y semiáridos, coincidiendo con los criterios de

Masera *et al.*, (1999) y Ramírez (2004) citados por García *et al.*, (2012) quienes mencionan que los indicadores de calidad de suelo deben obedecer ciertas condiciones entre ellas deben ser

integradores, fáciles de medir, aplicables en un rango de ecosistemas, sensibles a los cambios que sufre el suelo, integrar procesos químicos físicos y biológicos.

Cuadro 6 Selección de variables en función a escalas definidas

Variables	CP1	CP2	Nº de correlaciones con otras variables >0.6	Grado de dificultad para la medición	Grado de dificultad para la medición
CIC	0.969	-0.137	6	30	3
pH	0.925	-0.126	5	7	1
Ca	0.885	-0.382	5	15	2
K	0.880	0.078	6	15	2
CE	0.813	-0.200	6	7	1
P	-0.808	-0.061	5	30	3
Na	0.646	0.210	3	15	2
NT	-0.290	0.869	2	35	3
MO	-0.304	0.820	1	26	3
Mg	0.445	0.811	2	15	2
NO2	0.548	-0.618	1	35	4
Ao	-0.726	-0.584	1	25	2

Fácil=1 menos Fácil=2 Difícil=3 Muy difícil=4

Este resultado no es equivalente con el reporte de Campitelli *et al.*, (2010) quienes seleccionaron como indicadores de calidad de suelo a la materia orgánica, nitrógeno total y fósforo extractable para suelos agrícolas en la región central de Córdoba Argentina lo cual constata que los indicadores de calidad de suelo varían de un ecosistema a otro por la naturaleza de los mismos.

Conclusiones

La CP1, está relacionado con los cationes de cambio que intervienen en la CIC, por tanto en la fertilidad del suelo, asimismo esta componente está relacionado con indicadores de reacción química del suelo (pH y CE). De manera opuesta la CP1 está relacionado con elementos disponibles para la planta como el P, y con indicadores de la propiedad física del suelo.

La CP2 está relacionado con variables que determinan la fertilidad actual y potencial de los

elementos del suelo ya sean orgánicos e inorgánicos, la disponibilidad de nutrientes para la planta y propiedad física del suelo.

Todas las variables relacionadas con la CP1 y CP2 determinan la diferenciación entre suelos de ecosistemas áridos del altiplano, entonces son indicadores de calidad del suelo con vegetación nativa tipo tólar.

La variable CIC y MO en ecosistemas con gran limitación climática y condición de suelos áridos y semiáridos son los más indicados para medir la calidad del suelo pero no son los más prácticos por la complejidad que conlleva su determinación.

El análisis de componentes principales permitió establecer al pH y CE como los indicadores más adecuados para evaluar suelos del altiplano árido y semiárido.

Referencias citadas

- Alzerreca A.H., Laura J. Prieto G. C., Céspedes J. E., Calle M. P., Vargas A., Cardozo, G. A. y Zarate, V. 2002. Estudio de la tola y su capacidad de soporte para ovinos y camélidos en el ámbito boliviano del sistema T.D.P.S. (Subcontrato 21.07), Autoridad Binacional del Lago Titicaca (ALT), Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). AIGACAA. La Paz, Bolivia.
- Andrades, M. y Martínez, M.E. 2014. Fertilidad del suelo y parámetros que la definen. Universidad de la Rioja, IBERUS. 3ra. Edición IV serie. Logroño, España.
- Campitelli, P., Aoki, A., Gudelj, O., Rubenacker, A. y Sereno, R. 2010. Selección de indicadores de calidad de suelo para determinar los efectos del uso y prácticas agrícolas en un área piloto de la región central de Córdoba. *Revista científica Ciencia del suelo*. Vol.28, N° 2. Córdoba Argentina pp. 223-231.
- COMPO 2013. “El Magnesio: nutriente esencial en la producción de frutales y cultivos”: Red Agrícola N° 58, Publicaciones COMPO. Chile <http://www.compo-expert.com/cl/novedades/publicaciones-compo.html>.
- Espinosa, J. 2006. Suelos Volcánicos, Dinámica del Fósforo y Producción de Papa. In Memorias del II Congreso Ecuatoriano de la Papa, Centro Internacional de la Papa. Agricultural research for development. Ambato. Ecuador. <http://cipotato.org/es/cip-quito/informacion/congresos/ii-congreso-ecuatoriano-de-la-papa/#sthash.j7XgeKm9.dpuf>
- FAO. 2015. Los suelos constituyen la base de la vegetación. Hoja divulgativa: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Roma, Italia. pp 3. <http://www.scielo.org.ar/scielo.php?>
- Fernández, L. L.C., Rojas, A. G. N., Roldán, C. T. G., Ramírez, I. M. E. Zegarra M. H. G., Hernández, U. R., Reyes, Á. R. J., Flores, H.D. y Arce, O. J. M. 2006. Manual de técnicas de análisis de suelos aplicadas a la remediación de sitios contaminados. Instituto Mexicano del Petróleo. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología D.F. México.
- Garrido V. S. 1994. Interpretación de análisis de suelos. Hojas divulgadoras N° 5/93. Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación. Instituto de Reforma y Desarrollo Agrario. Dirección General de Infraestructura y Cooperación, Madrid. España.
- García, Y., Ramírez, W. y Sánchez, S. 2012. Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. *In Revista Pastos y Forrajes*. Vol. 35, N°2, Estación Experimental de Pastos y Forrajes “Indio Hatuey”. Matanzas, Cuba. pp125-135. <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=269125071001>
- Hidalgo R. 2003. Variabilidad Genética y Caracterización de Especies Vegetales *In: Análisis estadístico de datos de caracterización Morfológica de Recursos Fitogenéticos*. Boletín técnico N°8. Instituto Internacional de Recursos Fitogenéticos (IPGRI), Cali, Colombia.
- Lastra, C. O. 2010. Sodio en plantas C4. In C4 y CAM Características generales y uso en programas de desarrollo de tierras áridas y semiaridas. Ed. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Madrid, España. pp 152-153
- López, A. R., Villavicencio, F. E., Real, R. M.A., Ramírez, B. J. L. y Murillo, A. B. 2003. Macronutrientes en suelos de desierto con potencial agrícola Terra Latinoamericana Vol.21, N°3. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, Chapingo México. pp 333-340
- Martini J.A. 1969. Distribución geográfica y características de los suelos derivados de cenizas volcánicas en Centroamérica. In Panel sobre suelos derivados de cenizas volcánicas de América Latina. Centro de Enseñanza e Investigación del IICA Turrialba, Costa Rica. pp 18. <https://books.google.com.bo/books?id=uykOAQAIAAJ&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>

- Mostacedo, B. y Fredericksen, T., S. (2000). Manual de Métodos Básicos de Muestreo y Análisis en Ecología Vegetal. Proyecto de Manejo Forestal Sostenible (BOLFOS). USAID, PL-480, MDSP, Santa Cruz de la Sierra, Bolivia. pp 4-5.
- Navarro, G. y Ferreira, W. 2009. Mapa biogeográfico de Bolivia. Rumbol. Naturaleza Ciencia Sociedad. Diseño Editorial: Los Tiempos. Cochabamba. Bolivia.
- Orsag, V. 2009. Degradación de suelos en el altiplano boliviano, causas y medidas de mitigación. ANALISIS. Instituto Boliviano de Economía y Política Agraria. Journal, Vol.1, N°3. La Paz, Bolivia. pp 27-30 <http://www.revistasbolivianas.org.bo/pdf/ra/v1n3/v1n3a06.pdf>
- Pavón, C. A.B. 2003. Instalación de riego por goteo en una parcela de maíz. Universidad de Castilla - La Mancha. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola de Ciudad Real. Proyecto fin de Carrera. Castilla La Mancha. España.
- Palma, M. y Segat, A.L. 2000. Nitrógeno del suelo. In Principios de edafología. 2da. Edición. Editorial. Facultad de Agronomía. Buenos Aires, Argentina. pp 239-252
- Perdomo, C. y Barbazan, M. (2001). Nitrógeno. Facultad de Agronomía, Universidad de la República. Área de Suelos y Agua. Montevideo, Uruguay. pp 2-13.
- Rojas, W. C. 2009. Interpretación de la disponibilidad de fósforo en los suelos de Chile. Centro Regional de Investigación, INIA La Platina. Santiago. Chile. Pp 24-26
- Santibáñez, V., C. 2005. Determinación del pH y conductividad eléctrica del suelo. Universidad de Chile. Proyecto MECESUP UCH 0303, Modernización e Integración Transversal de la Enseñanza de Pregrado en Ciencias de la Tierra. Santiago. Chile.
- Santos, D.J., Wilson, M.G. y Ostinelli, M. 2010. Metodología de muestreo de suelo y ensayos a campo. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Proyectos integrados PNCER022411. Buenos Aires. Argentina.
- Simon, M., Peralta, N. y Costa, J.L. 2013. Relación entre la conductividad eléctrica aparente con propiedades del suelo y nutrientes. Asociación Argentina Ciencia del Suelo (AACS). AGD. CONICET. Facultad de Agronomía de la Universidad Mar del Plata. Estación Experimental INTA. Mar del Plata, Argentina. pp 45-55
- Thompson, M. y Troeh, F. R. 2002. Los suelos y su fertilidad. Centro Pirenaico de Biología Experimental de Jaca. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Editorial REVERTE S.A. Barcelona. España. pp 361-369.
- Triveli, J.,M.A. y Valdivia, R. V. 2009. Alcances sobre Flore y Vegetación de la Cordillera de Los Andes. Región de Arica y Parinacota y Región de Tarapacá. Segunda Edición. Ministerio de Agricultura. Servicio Agrícola y Ganadero. Santiago. Chile. 180 p
- Vidal, M.,J.L. 2003. Dinámica del potasio en el suelo y su requerimiento por los cultivos. Colegio de postgraduados. Institución de enseñanza e investigación en ciencias agrícolas. Instituto de recursos naturales. Proyecto de investigación, Nivel Maestría. Texcoco, México
- Zagal, E., Rodríguez, N., Vidal, I. y Flores, A. B. (2002). La fracción liviana de la materia orgánica de un suelo volcánico bajo distinto manejo agronómico como índice de cambios de la materia orgánica lábil. Agricultura Técnica, 62(2), Universidad de Concepción, Facultad de Agronomía. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación Quilamapu. Chillán, Chile. pp 284-296. http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S036528072002000200011&lng=es&tlng=es. 10.4067/S0365-28072002000200011.