

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE AGRONOMÍA



T E S I S

**EVALUACIÓN DE INDICADORES DE CALIDAD DE SUELOS MEDIANTE
ANÁLISIS MULTIVARIADO DE 223 MUESTRAS DE SUELOS DEL DISTRITO DE
HUARANGO – SAN IGNACIO**

**Para Optar el Título Profesional de:
INGENIERO AGRÓNOMO**

**Presentado por el Bachiller:
JHON MABER IRIGOIN AGUILAR**

**Asesor:
Dr. EDIN ALVA PLASENCIA**

Cajamarca – Perú

2022



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

"NORTE DE LA UNIVERSIDAD PERUANA"

Fundada por Ley N° 14015, del 13 de febrero de 1962

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

Secretaría Académica



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En la ciudad de Cajamarca, a los veintiún días del mes de octubre del año dos mil veintidós, se reunieron en el ambiente 2C - 202 de la Facultad de Ciencias Agrarias, los miembros del Jurado, designados según **Resolución de Consejo de Facultad N° 278-2021-FCA-UNC, de fecha 31 de agosto del 2021**, con la finalidad de evaluar la sustentación de la **TESIS** titulada: **"EVALUACIÓN DE INDICADORES DE CALIDAD DE SUELOS MEDIANTE ANÁLISIS MULTIVARIADO DE 223 MUESTRAS DE SUELOS DEL DISTRITO DE HUARANGO - SAN IGNACIO"**, realizada por el Bachiller **JHON MABER IRIGOIN AGUILAR** para optar el Título Profesional de **INGENIERO AGRÓNOMO**.

A las once horas y cero minutos, de acuerdo a lo establecido en el **Reglamento Interno para la Obtención de Título Profesional de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Cajamarca**, el Presidente del Jurado dio por iniciado el Acto de Sustentación, luego de concluida la exposición, los miembros del Jurado procedieron a la formulación de preguntas y posterior deliberación. Acto seguido, el Presidente del Jurado anunció la aprobación por unanimidad, con el calificativo de dieciséis (16); por tanto, el Bachiller queda expedito para proceder con los trámites que conlleven a la obtención del Título Profesional de **INGENIERO AGRÓNOMO**.

A las doce horas y ocho minutos del mismo día, el Presidente del Jurado dio por concluido el Acto de Sustentación.



Dr. Glicerio Torres Carranza
PRESIDENTE



Ing. M. Sc. David Ricardo Uriol Valverde
SECRETARIO



Ing. M. Sc. Attilio Israel Cadenillas Martinez
VOCAL



Dr. Edin Edgardo Alva Plasencia
ASESOR

DEDICATORIA

A mis padres Avelina Aguilar y Víctor Irigoín por el inmenso amor que me dan cada día y por enseñarme a luchar por mis sueños, sus consejos y enseñanzas siempre reflejarán en mi vida personal y profesional.

AGRADECIMIENTO

A Dios por regalarme la vida y cuidar de mi día tras día para seguir siempre de pie a pesar de las luchas, a ti Dios toda la gloria y la honra.

A mis padres por estar siempre a mi lado en esta etapa y juntos poder cumplir cada uno de mis sueños.

A mi asesor Dr. Edin Alva Plasencia por impartir mucho conocimiento en mi vida profesional y por su apoyo para realizar el presente trabajo.

Al Dr. Wilfredo Poma Rojas por brindarme los resultados de los análisis de los suelos para poder procesarlos y analizarlos en la respectiva tesis.

ÍNDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS

RESUMEN.....	i
ABSTRACT	ii
CAPÍTULO I	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivo general	2
1.2 Objetivos específicos	2
CAPÍTULO II.....	4
MARCO TEÓRICO.....	4
2.1 Antecedentes de la investigación.....	4
2.2 Bases teóricas.....	6
2.2.1 La calidad del suelo.....	6
2.2.2 Indicadores de calidad del suelo	7
2.2.3 Indicadores físicos	9
2.2.4 Indicadores químicos	11
2.2.5 Indicadores biológicos.....	13
2.2.6 ¿Cómo se determinan los indicadores de calidad?	15
2.2.7 ¿Qué es un análisis multivariado?	16
2.2.7 ¿Qué es un análisis de componentes principales?	16
2.2.8 Utilidad del análisis multivariado y de componentes principales en estudios de suelos.....	19
2.2.9 Definición de términos básicos	21
2.2.9.2 Aluminio cambiante	21

2.2.9.3 Calcio cambiabile	21
2.2.9.4 Calcáreo total	21
2.2.9.8 Capacidad de cambio catiónico	22
2.2.9.9 Conductividad eléctrica	22
2.2.9.10 Entisoles	22
2.2.9.11 Fósforo disponible	22
2.2.9.12 Inceptisoles.....	22
2.2.9.13 Leptisoles	23
2.2.9.14 Magnesio cambiabile.....	23
2.2.9.15 Materia orgánica.....	23
2.2.9.16 Nitrógeno total	23
2.2.9.17 pH	23
2.2.9.18 pH actual.....	23
2.2.9.19 pH potencial.....	23
2.2.9.20 Phaeozem	24
2.2.9.21 Phaeozem calcárico	24
2.2.9.22 Phaeozem lúvico	24
2.2.9.23 Phaeozem háplico	24
2.2.9.24 Potasio cambiabile	24
2.2.9.25 Potasio disponible	24
2.2.9.26 Regosoles.....	25
2.2.9.27 Regosol calcárico	25
2.2.9.28 Saturación de bases.....	25
2.2.9.29 Sodio cambiabile	25
CAPÍTULO III	26
MATERIALES Y MÉTODOS	26
3.1 Localización de la investigación	26
3.2 Materiales	29
3.3 Metodología	29
3.3.1 Trabajo en gabinete.....	30
3.2.2. Análisis multivariado.....	30
3.2.2.1 Matriz de variable respuesta.	30

3.2.2.3	Vectores de medias y matrices de varianza covarianza.....	31
3.2.2.4	Correlación y matriz de correlación.....	32
CAPÍTULO IV	.....	35
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	.....	35
4.1.	Análisis de varianza para las 16 propiedades químicas.....	35
4.1.1	<i>pH del suelo</i>	36
4.1.2	<i>Aluminio del suelo</i>	37
4.1.3	<i>Calcáreo total</i>	38
4.1.4	<i>Conductividad eléctrica</i>	39
4.1.5	<i>Materia orgánica</i>	40
4.1.6	<i>Nitrógeno total</i>	42
4.1.7	<i>Fósforo disponible</i>	43
4.1.8	<i>Potasio disponible</i>	44
4.1.9	<i>Capacidad de cambio catiónico</i>	45
4.1.10	<i>Calcio cambiable</i>	46
4.1.11	<i>Magnesio cambiable</i>	47
4.1.12	<i>Potasio cambiable</i>	48
4.1.13	<i>Sodio cambiable</i>	49
4.1.14	<i>Saturación de bases</i>	50
4.1.15	<i>Acidez cambiable</i>	51
4.2.	Análisis multivariado de correlaciones	52
4.3.	Análisis de los componentes principales (ACP)	59
4.4.	Análisis de la calidad del suelo	63
CAPÍTULO V	.....	69
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	.....	69
5.1	Conclusiones.....	69
5.2	Recomendaciones	69
CAPÍTULO VI	.....	71
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	.....	71
ANEXOS	.....	78

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Análisis de varianza para las 16 propiedades químicas, sus medias, sus desviaciones estándar (entre paréntesis) y su coeficiente de variación (CV)</i>	35
Tabla 2. <i>Matriz de correlación de las propiedades químicas de los suelos vírgenes</i>	53
Tabla 3. <i>Matriz de correlación de las propiedades químicas de los suelos cultivados</i> ..	56
Tabla 4. <i>Resultados de ACP, componentes principales (CP), valores propios y autovectores (AV) de las propiedades químicas en los suelos vírgenes, suelos cultivados y ambos</i>	60
Tabla 5. <i>Indicadores y sus valores medios, máximos y mínimos</i>	64
Tabla 6. <i>Matriz Básica de datos para la caracterización de 223 muestras de suelos del distrito de Huarango</i>	79

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Ubicación geográfica del distrito de Huarango - San Ignacio</i>	26
<i>Figura 2. Localidades y puntos de muestreo del distrito de Huarango</i>	26
<i>Figura 3. Imagen satelital del área que comprende todos los puntos de muestreo</i>	27
<i>Figura 4. El pH potencial y actual de los suelos vírgenes y cultivados</i>	36
<i>Figura 5. Calcáreo total de los suelos vírgenes y cultivados</i>	38
<i>Figura 6. Conductividad eléctrica de los suelos vírgenes y cultivados</i>	39
<i>Figura 7. Materia orgánica de los suelos vírgenes y cultivados</i>	40
<i>Figura 8. Nitrógeno total de los suelos vírgenes y cultivados</i>	42
<i>Figura 9. Fósforo disponible de los suelos vírgenes y cultivados</i>	43
<i>Figura 10. Potasio disponible de los suelos vírgenes y cultivados</i>	44
<i>Figura 11. Capacidad de cambio catiónico de los suelos vírgenes y cultivados</i>	45

<i>Figura 12.</i> Calcio cambiabile de los suelos vírgenes y cultivados.....	46
<i>Figura 13.</i> Magnesio cambiabile de los suelos vírgenes y cultivados	47
<i>Figura 14.</i> Potasio cambiabile de los suelos vírgenes y cultivados.....	48
<i>Figura 15.</i> Sodio cambiabile de los suelos vírgenes y cultivados	49
<i>Figura 16.</i> Saturación de bases de los suelos vírgenes y cultivados	50
<i>Figura 17.</i> Acidez cambiabile de los suelos vírgenes y cultivados.....	51
<i>Figura 18.</i> Análisis de componentes principales	59
<i>Figura 19.</i> Valores normalizados de los indicadores de calidad de los suelos de Huarango.	65
<i>Figura 20.</i> Copia de tarjeta de recolección de datos: muestra N° 02, suelo bajo cultivo de café.....	85
<i>Figura 21.</i> Copia de tarjeta de recolección de datos: muestra N° 02 (reverso), suelo bajo cultivo de café.....	73
<i>Figura 22.</i> Copia de tarjeta de recolección de datos: muestra N° 11, suelo bajo vírgen.	86
<i>Figura 23.</i> Copia de tarjeta de recolección de datos: muestra N° 11 (reverso), suelo virgen.....	88
<i>Figura 24.</i> Copia de resultados de análisis de suelos de las muestras del N° 25 al N° 27.....	89
<i>Figura 25.</i> Copia de resultados de análisis de suelos de las muestras del N° 58 al N° 60.....	90
<i>Figura 26.</i> Copia de resultados de análisis de suelos de las muestras del N° 220 al ° 223	91

RESUMEN

El presente trabajo se realizó para evaluar los indicadores químicos de calidad mediante un análisis multivariado de suelos del distrito de Huarango – San Ignacio, en un área de 6 315,93 ha. Se demostró que a través de un análisis multivariado y de componentes principales se puede facilitar la reducción de una gran cantidad de datos a un grupo menor que representen a la totalidad y en base a estos se pueda tomar decisiones al momento de evaluar la calidad de estos suelos. Se utilizó 16 propiedades químicas de 223 resultados de análisis de suelos realizados el 2011 en el distrito de Huarango (Estudio de suelos – Proyecto San Antonio de Huarango). El análisis de varianza determinó que no hay diferencias significancias entre las propiedades químicas de los suelos tanto vírgenes como cultivados. Para determinar el grado de correlación entre las propiedades químicas se realizó un análisis multivariado de correlaciones utilizando el paquete estadístico InfoStat, demostrando que hay una alta correlación entre las propiedades químicas; además a través de un análisis de componentes principales se determinó como indicadores químicos para los suelos del distrito de Huarango: pH, saturación de bases, fósforo disponible, nitrógeno total, potasio disponible y capacidad de cambio catiónico. Por último, evaluando la calidad de los suelos, los bajos valores de la materia orgánica, el nitrógeno total y magnesio indican suelos de baja calidad; y los altos valores del pH, fósforo, saturación de bases y capacidad de cambio catiónico indican suelos de alta calidad.

Palabras clave: indicadores químicos, análisis multivariado, calidad del suelo.

ABSTRACT

The present work was carried out to evaluate the chemical quality indicators through a multivariate soil analysis of the Huarango - San Ignacio district, in an area of 6 315,93 ha. It was shown that through a multivariate and principal component analysis, it is possible to reduce a large amount of data to a smaller group that represents the whole and based on these, decisions can be made when evaluating the quality of these data. floors. Were used 16 chemical properties of 223 soil analysis results carried out in 2011 in the district of Huarango (Soil Study – San Antonio de Huarango Project). The analysis of variance determined that there are no significant differences between the chemical properties of the soils both virgin and cultivated. To determine the degree of correlation between the chemical properties, a multivariate correlation analysis was performed using the InfoStat statistical package, showing that there is a high correlation between the chemical properties; In addition, through an analysis of main components, the following chemical indicators were determined for the soils of the Huarango district: pH, base saturation, available phosphorus, total nitrogen, available potassium and cation exchange capacity. Finally, evaluating the quality of the soils, the low values of organic matter, total nitrogen and magnesium indicate low quality soils; and the high values of pH, phosphorus, base saturation and cation exchange capacity would high quality soils.

Keywords: chemical indicators, multivariate analysis, soil quality.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Todo tipo de vida depende de la calidad del suelo para su supervivencia, lo que implica reconocer las funciones del suelo, como: promover la productividad del sistema sin perder sus propiedades físicas, químicas y biológicas; atenuar contaminantes ambientales y patógenos; y favorecer la salud de plantas, animales y humanos; en consecuencia, forman los principales componentes de la calidad del suelo (Bautista et al. 2004).

Los suelos constituyen la base para el desarrollo sostenible de la agricultura, las funciones esenciales de los ecosistemas y la seguridad alimentaria; las alteraciones que conllevan a la degradación del suelo es una amenaza real y creciente causada por usos insostenibles del suelo y prácticas de gestión y extremos climáticos resultantes de diversos factores sociales, económicos y de gobernanza (FAO 2015).

Meza et al. (2017) mencionan que la degradación es considerada una ruptura del equilibrio de las propiedades del recurso suelo, que limita su productividad y capacidad de mantener las funciones ambientales que le son propias; y es particularmente ocasionada por una explotación y manejo inadecuados, disminuyendo de este modo su calidad. Por lo que Estrada et al. (2017) indican que en un mundo que debe enfrentar un incremento de población, en el contexto de cambio climático, el mantenimiento de la calidad de los suelos va a ser cada vez más importante. Para esto es prioritario su conocimiento y cuantificación, a través de la identificación de indicadores que representen los diferentes estados, trayectorias y tendencias (Wilson 2017).

Bran et al. (2017) también indican que, a través de indicadores de calidad de suelo, ayuda a determinar el grado de degradación del suelo y a la valoración de su calidad, que permitan visualizar el origen de los procesos de degradación, y a partir de esto, delinear pautas de manejo que tiendan a mitigarlos o revertirlos.

Existen investigaciones de autores sobre la calidad y salud del suelo, que hacen uso de métodos estadísticos multivariados, para evaluar qué indicadores físicos, químicos y biológicos influyen en su calidad. Al no tener información de indicadores de calidad del suelo en la región de Cajamarca, ni en el distrito de Huarango; y poseer una data de los resultados de 16 propiedades químicas de 223 muestras de suelos, realizados en el distrito de Huarango – San Ignacio. Se usó un análisis multivariado de componentes principales, para evaluar qué indicadores químicos influyen más en la calidad de esos suelos; y de esa manera, disminuir la base de datos que indican su calidad; del mismo modo, en estudios posteriores disminuir el costo al realizar el análisis de suelos a las propiedades químicas más representativas de esos suelos.

1.1 Objetivo general

- Evaluar los indicadores químicos de calidad del suelo a través de un análisis multivariado y análisis de componentes principales de 223 muestras de suelos del distrito de Huarango, San Ignacio.

1.2 Objetivos específicos

- Evaluar a través de un análisis de varianza si existe diferencias significativas entre las propiedades químicas de 223 muestras de suelos del distrito de Huarango, San Ignacio.

- Evaluar a través de un análisis multivariado de correlaciones si existe correlación entre las propiedades químicas evaluadas de 223 muestras de suelos del distrito de Huarango, San Ignacio.
- Determinar a través de un análisis de componentes principales, de los valores de las propiedades químicas de 223 muestras de suelo del distrito de Huarango, San Ignacio, qué propiedades químicas son las que más influyen en la calidad de los suelos.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de la investigación

Casalinho et al. (2007) "*Calidad del suelo como indicador de sostenibilidad de agro ecosistemas*", para evaluar la calidad del suelo, seleccionaron un conjunto de propiedades químicas, y a través de un análisis de componentes principales determinaron que sólo el carbono orgánico influyó más en las diferentes áreas evaluadas.

Navarro et al. (2008) "*Indicadores físicos del suelo bajo labranza de conservación y su relación con el rendimiento de tres cultivos*", para determinar los indicadores físicos - químicos del suelo usó el análisis multivariado de regresión lineal múltiple y correlaciones; y determinaron como indicadores de calidad del suelo a la materia orgánica y la conductividad hidráulica saturada.

Villareal et al. (2013) "*Índice de calidad del suelo en áreas cultivadas con banano en Panamá*", para seleccionar los indicadores físicos, químicos y biológicos, usaron un análisis de regresión lineal múltiple y de componentes principales, determinando así a los siguientes indicadores: pH, potasio, fósforo, cinc, densidad aparente, respiración microbiana y biomasa microbiana; los cuales influenciaron sobre la productividad.

Mendes et al. (2013) "*Selección de indicadores químicos de calidad de los suelos de la región alrededor del lago de Sobradinho – BA mediante análisis multivariado*", con el objeto de seleccionar las propiedades químicas que indiquen la calidad de los suelos, usaron el análisis de correlaciones y análisis de componentes

principales a 12 propiedades químicas obteniendo como indicadores: pH, aluminio, saturación por aluminio y saturación de bases.

Da costa (2016) "*Indicadores de calidad del suelo en diferentes modelos de agricultura familiar en el semiárido Pernambuco*", con el objetivo de evaluar los cambios ocurridos en las propiedades físicas, químicas y biológicas usadas como indicadores de calidad del suelo; usó el análisis de varianza, el análisis multivariado y de componentes principales en suelos cultivados y vírgenes; y determinó que: porosidad, densidad, carbono orgánico, respiración basal y cociente microbiano influenciaron más en la calidad del suelo.

Meza et al. (2017) en su investigación "*Indicadores para el monitoreo de la calidad del suelo en áreas periurbanas. Valle de Quillota, Cuenca del Aconcagua, Chile*", con el propósito de generar un conjunto de indicadores químicos útiles y de fácil seguimiento que permitan realizar comparaciones, evaluaciones y monitoreo de la calidad del suelo, determinaron como indicadores a la conductividad eléctrica, materia orgánica, pH y capacidad de intercambio catiónico.

Barrezueta et al. (2017) en su trabajo de investigación "*Determinación de indicadores para calidad de suelos cultivados con cacao en provincia de El Oro - Ecuador*", con el objetivo de determinar indicadores edáficos, realizaron un análisis de componentes principales a 19 propiedades físicas y químicas del suelo, y determinaron como indicadores al pH, suma de bases, carbono, nitrógeno, cobre, porcentaje de arena y magnesio.

Castillo et al. (2021) "*Evaluación de la calidad de suelo: generación e interpretación de indicadores*", con el objetivo de evaluar la calidad del suelo analizando

propiedades físicas, químicas y biológicas, mediante el análisis de componentes principales realizó la determinación de los siguientes indicadores: pH, materia orgánica, fósforo y hierro.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 *La calidad del suelo*

La calidad del suelo es la condición de éste para producir sin degradarse, ni ocurra daños en el medio ambiente (Meza et al. 2017). Además, la capacidad del suelo debe mantener sus propiedades físicas, químicas y biológicas a niveles que impliquen productividad; debe atenuar los contaminantes ambientales, y producir alimentos sanos y nutritivos para los seres humanos y otros microorganismos (Astier et al. 2002).

Para Bautista et al. (2004) la calidad del suelo es la capacidad del suelo para promover la productividad del sistema sin perder sus propiedades químicas, físicas y biológicas. Por su parte (Cerón y Melgarejo 2005; Paula et al. 2015; Estrada et al. 2017) mencionan que está determinada por funciones simultáneas, como: sostener la productividad de los cultivos, mantener la calidad del agua y del aire, y proporcionar condiciones saludables para las plantas, animales y el hombre dentro de los límites de un ecosistema natural o manejado.

Mientras que, en términos de sostenibilidad y medio ambiente, para Casalinho et al. (2007) la calidad del suelo es la capacidad que tiene un determinado suelo, para realizar una o más funciones relacionadas con la actividad sostenible, la productividad, la diversidad biológica y el mantenimiento o la calidad del medio ambiente. Por su parte (García et al. 2012; Villareal et al. 2013) mencionan que, las funciones que se realizan

en él deben promover una productividad biológicamente sostenible y calidad ambiental, favoreciendo de ese modo la salud de las plantas, los animales y los seres humanos.

En otros conceptos, para Da costa (2016) la calidad del suelo es una evaluación sistémica de sus recursos, lo que permite comprender la capacidad de un determinado suelo desarrollar múltiples funciones en el ambiente, manteniendo su sustentabilidad en el ecosistema. En cambio, Castillo et al. (2021) mencionan que la calidad del suelo se ve afectada por las prácticas que se realizan en él, alterando sus propiedades, más si los niveles de salida de energía (productos obtenidos en la cosecha) son superiores a los ingresos (labranza, riego, fertilización, etc.) o son poco resilientes, entonces serán limitantes para la producción y otras funciones del suelo.

2.2.2 Indicadores de calidad del suelo

Para evaluar los cambios en la calidad del suelo es preciso contar con variables que puedan servir para evaluar la calidad del suelo, variables conocidas como indicadores, pues representan una condición y conllevan información acerca de los cambios o tendencias de esa condición (Bautista et al. 2004).

García et al. (2012); Meza et al. (2017) mencionan que se utilizan las propiedades físicas, químicas y biológicas como indicadores de calidad del suelo, que permiten realizar comparaciones, evaluaciones y monitoreo; por lo que, sirven como una herramienta rápida para tomar decisiones, ya que son sensibles al manejo en el corto, mediano y largo plazos, dependiendo del suelo que se evalúe, ya que varían de acuerdo a las características predominantes de la zona.

Astier et al. (2002) conciben a un indicador como una herramienta de medición que da información sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, y a

través de los incrementos o descensos de sus valores se percibe la calidad del suelo. Mientras que, para Villareal et al. (2013) un indicador es una variable que resume o simplifica información que es relevante; haciendo que una condición de interés se haga perceptible y que se cuantifique, mida y comunique en forma comprensible información importante. Complementariamente Da costa (2016) menciona que los indicadores son atributos que miden o reflejan el estado ambiental o la condición de sustentabilidad del ecosistema, los cuales proporcionan un mejor análisis de las áreas estudiadas, además de variar en el tiempo o espacio por la intervención del hombre o fenómenos naturales.

Por otro lado, Cerón y Melgarejo (2005) aportan que la determinación de indicadores responde a la necesidad de medidas que permitan evaluar los efectos del manejo del suelo en su calidad; los indicadores que integran las propiedades del suelo, deben ser sensibles a los cambios en un período de tiempo relativamente corto, aún bajo los cambios de las condiciones climáticas. Mientras que, Navarro et al. (2008) agregan que los indicadores varían a través del tiempo por el cambio en sus propiedades físicas, químicas y biológicas. Según Rendón et al. (2011) los indicadores varían de una localidad a otra dependiendo del tipo, uso, función y de los factores de formación del suelo.

Finalmente, para la selección o determinación de los indicadores de calidad del suelo se usa un análisis multivariado, como el de componentes principales, para determinar aquellos que tienen mayor impacto sobre la calidad del suelo (Estrada et al. 2017; Castillo et al. 2021).

2.2.3 Indicadores físicos

García et al. (2012) mencionan que los indicadores físicos son de gran importancia al momento de evaluarlos, ya que no son fáciles de mejorar; y propone como indicadores físicos del suelo para evaluar su calidad a la textura, profundidad del suelo, infiltración, densidad aparente, capacidad de retención del agua y estabilidad de agregados.

Podemos mencionar también que la cantidad de propiedades físicas utilizadas depende del objetivo de la investigación; por ejemplo, Bautista et al. (2004) mencionan que las propiedades físicas usadas como indicadores para determinar la calidad del suelo son las siguientes: textura, profundidad del suelo, infiltración, densidad aparente y capacidad de retención de agua. Por su parte Cerón y Melgarejo (2005) evaluaron otras propiedades físicas, como: estabilidad estructural, distribución de poro, capacidad de campo, velocidad de infiltración, textura y densidad. Mientras que, Navarro et al. (2008) los indicadores físicos que consideraron para su estudio fueron: resistencia mecánica, densidad aparente, porosidad total, porcentaje (arena, limo y arcilla), humedad (aprovechable, saturada y residual), conductividad hidráulica saturada, infiltración acumulada y sorbilidad.

Dependiendo de la investigación hay autores que usan menos propiedades físicas, como en la investigación de Febles et al. (2011) para determinar aquellos que influyen más en la producción de semillas, evaluó a los indicadores físicos: profundidad efectiva, pedregosidad y drenaje. Así mismo Barrezueta et al. (2017) para identificar variables mínimas que ayuden a identificar los cambios mínimos en los suelos, que resuman y simplifiquen información relevante, evaluaron a los indicadores: porcentajes

de arcilla, arena y limo.

En investigaciones con diferentes sistemas de cultivos, por ejemplo: Rendón et al. (2011) para determinar los indicadores que más influyeron en diferentes sistemas de cultivos, evaluaron a los siguientes indicadores físicos: densidad aparente, estabilidad estructural y textura. Por su parte Villareal et al. (2013) con el objetivo de obtener un índice agrícola y ambiental en los suelos cultivados con banano y seleccionar indicadores físicos, evaluaron a los siguientes: color, textura, estructura, infiltración básica, resistencia a la penetración y densidad aparente.

Para diagnosticar la calidad del suelo bajo el cultivo de durazno en varios agroecosistemas, Paula et al. (2015) evaluaron los siguientes indicadores físicos: porosidad total, macroporosidad, microporosidad, densidad, diámetro medio ponderado, tasa de infiltración del agua en el suelo y espesor del horizonte A. Mientras que, Da costa (2016) para evaluar los cambios ocurridos en las propiedades del suelo en diferentes sistemas de producción, evaluaron a los siguientes indicadores: cantidad de arena, limo y arcilla; arcilla dispersa en agua, grado de floculación, densidad del suelo, densidad de partícula y porosidad total. Así mismo, Castillo et al. (2021) para evaluar la calidad del suelo analizando sus propiedades y el efecto de las prácticas de manejo en diferentes sistemas de producción, evaluaron a la estabilidad de agregados en húmedo y la densidad aparente.

En otras investigaciones, en donde se involucra generar indicadores útiles y de fácil seguimiento que permitan realizar comparaciones, evaluaciones y monitoreo de la calidad del suelo a través del tiempo, Casalinho et al. (2007) en su investigación para evaluar la calidad del suelo, evaluaron a los indicadores: compactación, profundidad,

color, porosidad total, erosión, resistencia mecánica de la penetración del suelo, relación micro y macro porosidad, macro agregados y espesor del horizonte A. Por su parte Meza et al. (2017) para determinar la calidad del suelo, evaluaron a los siguientes indicadores físicos: estructura, compactación e infiltración.

2.2.4 Indicadores químicos

García et al. (2012) mencionan que los indicadores químicos están relacionados con la capacidad amortiguadora del suelo y la disponibilidad de nutrientes para las plantas y microorganismos; además, para evaluar su calidad proponen a los siguientes indicadores químicos: materia orgánica, pH, conductividad eléctrica, nitrógeno, fósforo, potasio, capacidad de intercambio catiónico y metales pesados disponibles.

Bautista et al. (2004) mencionan que las propiedades químicas usadas como indicadores para determinar la calidad del suelo son: materia orgánica, pH, conductividad eléctrica, nitrógeno, fósforo y potasio; las cuales definen la actividad química de las plantas y microorganismos, así mismo, la fertilidad y estabilidad del suelo. Por su parte Cerón y Melgarejo (2005) usaron como indicadores de calidad del suelo a las siguientes propiedades químicas: pH, capacidad de intercambio catiónico, materia orgánica, nitrógeno mineralizado, estado de óxido reducción y conductividad eléctrica. Mientras que, Navarro et al. (2008) los indicadores químicos que consideraron para su estudio fueron: materia orgánica y conductividad eléctrica.

En investigaciones con diferentes sistemas de cultivos, por ejemplo: Rendón et al. (2011), para determinar los indicadores que más influyeron en diferentes sistemas de cultivos, incluyeron como indicadores químicos a las siguientes propiedades: pH, materia orgánica, fósforo disponible, las bases intercambiables (calcio, magnesio,

sodio y potasio) y la capacidad de intercambio catiónico efectiva. En cambio, Barrezueta et al. (2017) para identificar variables mínimas que ayuden a identificar los cambios mínimos en los suelos cultivados con cacao, para resumir y simplificar información relevante, usaron como indicadores: la capacidad de intercambio catiónico, pH, conductividad eléctrica, nitrógeno amoniacal, fósforo, potasio, cobre, zinc, manganeso, azufre y bases cambiabiles.

Dependiendo de la investigación, hay autores que evalúan menos propiedades químicas; por ejemplo: en la investigación de Febles et al. (2011) para determinar aquellos que influyen más en la producción de semillas, evaluaron a los indicadores químicos: pH, materia orgánica, fósforo y potasio.

Para diagnosticar la calidad del suelo bajo el cultivo de durazno en varios agroecosistemas, Paula et al. (2015) usaron los siguientes indicadores químicos: fósforo, potasio, calcio, magnesio, capacidad de intercambio catiónico, materia orgánica, aluminio, pH, saturación de bases, cobre, zinc, manganeso y fierro. Mientras que, Da costa (2016) para evaluar los cambios ocurridos en las propiedades del suelo usadas como indicadores de calidad en diferentes sistemas de producción, evaluaron a los siguientes indicadores: pH, calcio, magnesio, sodio, potasio, suma de bases, capacidad de intercambio catiónico, porcentaje de saturación de bases, porcentaje de saturación de aluminio, fósforo disponible y carbono orgánico total. Así mismo, Castillo et al. (2021) para evaluar la calidad del suelo analizando sus propiedades y el efecto de las prácticas de manejo en diferentes sistemas de producción, evaluaron las siguientes propiedades químicas: pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, nitrógeno, relación C/N, fósforo, fierro, manganeso, zinc y porcentaje de carbonatos.

En otras investigaciones para generar indicadores de calidad del suelo, para evaluar su fertilidad y degradación del suelo, en su investigación Villazón et al. (2017) utilizaron a los siguientes indicadores: materia orgánica, pH, contenidos de calcio, magnesio, sodio y potasio; capacidad de intercambio catiónico, la capacidad de cambio de bases y la saturación de bases. Así mismo, Estrada et al. (2017) usaron los siguientes indicadores: pH, materia orgánica, fósforo disponible, (calcio, magnesio y potasio extraíbles) y capacidad de intercambio catiónico.

En otras investigaciones en donde se involucra generar indicadores útiles y de fácil seguimiento que permitan realizar comparaciones, evaluaciones y monitoreo de la calidad del suelo a través del tiempo, Casalinho et al. (2007) en su investigación para evaluar la calidad del suelo usaron los indicadores: materia orgánica, fósforo disponible y la saturación de bases. Por su parte Meza et al. (2017) utilizaron al pH, conductividad eléctrica, materia orgánica y capacidad de intercambio catiónico como indicadores.

2.2.5 Indicadores biológicos

Garbisu et al. (2007) mencionan que los indicadores biológicos son utilizados para obtener información de la salud del suelo, además añade que los más utilizados son: biomasa microbiana, respiración basal, nitrógeno mineralizable, actividades enzimáticas, composición y diversidad de las comunidades microbianas, abundancia y diversidad de macro, meso y microfauna. Por su parte García et al. (2012) mencionan como indicadores de la calidad del suelo: biomasa microbiana, nitrógeno potencial mineralizable, respiración edáfica y número de lombrices.

Bautista et al. (2004) mencionan que las propiedades biológicas usadas como indicadores para determinar la calidad del suelo son: carbono y nitrógeno de la masa

microbiana, respiración microbiana y nitrógeno potencialmente mineralizable. Por su parte, Cerón y Melgarejo (2005) usaron como indicadores de calidad del suelo: biomasa microbiana C, biomasa microbiana N, respiración, actividades enzimáticas, organismos indicadores, diversidad (composición y número de especies).

En investigaciones con diferentes sistemas de cultivos, por ejemplo: Rendón et al. (2011) para determinar los indicadores que más influyeron en diferentes sistemas de cultivos, incluyeron como indicadores a los macro invertebrados que incluye a las familias de insectos: lumbricidae, miltopoda y gastropoda.

Para diagnosticar la calidad del suelo bajo el cultivo de durazno en varios agroecosistemas, Paula et al. (2015) usaron los siguientes indicadores biológicos: relación ácaros y colémbolos, densidad de ácaros, densidad de colémbolos y población media de lombrices. Mientras que, Da costa (2016) para evaluar los cambios ocurridos en las propiedades del suelo, usadas como indicadores de calidad en diferentes sistemas de producción, usaron a los siguientes indicadores microbiológicos: respiración de la biomasa microbiana, cociente metabólico y cociente microbiano. Así mismo, Castillo et al. (2021) para evaluar la calidad del suelo analizando sus propiedades y el efecto de las prácticas de manejo en diferentes sistemas de producción, emplearon a las siguientes propiedades: densidad de lombrices y uso de agua residual.

En otras investigaciones para generar indicadores de calidad del suelo, para evaluar su fertilidad y degradación, en su investigación Estrada et al. (2017) usaron al indicador biológico carbono en la biomasa microbiana.

En otras investigaciones en donde se involucra generar indicadores útiles y de

fácil seguimiento que permitan realizar comparaciones, evaluaciones y monitoreo de la calidad del suelo a través del tiempo, Casalinho et al. (2007) en su investigación para evaluar la calidad del suelo usaron al indicador carbono microbiano. Por su parte Meza et al. (2017) evaluaron a los invertebrados y lombrices como indicadores biológicos.

2.2.6 ¿Cómo se determinan los indicadores de calidad?

Casalinho et al. (2007) mencionan que los indicadores se determinan mediante un análisis de componentes principales, a fin de verificar el comportamiento de un conjunto de propiedades físicas, químicas o biológicas; de un conjunto de parcelas de vegetación nativa y parcelas con diferentes años de manejo; en consecuencia, se determina así la existencia o no de las similitudes de los indicadores entre las parcelas. Por su parte Navarro et al. (2008) sostienen que se usa herramientas estadísticas como el análisis multivariado y análisis de componentes principales para evaluar los indicadores y la calidad del suelo. Así mismo, Colás et al. (2008) utilizan un análisis multivariado para determinar los indicadores de calidad del suelo.

En otras investigaciones, Da costa (2016) usa el análisis multivariado y de componentes principales para determinar aquellos que influyen más o son determinantes en la calidad del suelo y definirlos como indicadores. Así mismo, Barrezueta et al. (2017) mencionan que se determinan mediante un análisis de componentes principales; aplicado a un grupo de propiedades físicas y químicas del suelo, para seleccionar los indicadores determinantes, que expliquen el procedimiento al menos un 80 % de la variabilidad total de los indicadores.

Para Castillo et al. (2021) la determinación de indicadores puede hacerse mediante el uso de técnicas multivariadas como el análisis de componentes principales,

el cual permite obtener información a menor costo y tiempo, en contraste con el análisis de grandes bases de datos, no siempre disponibles.

2.2.7 ¿Qué es un análisis multivariado?

El análisis multivariado engloba a todos aquellos métodos estadísticos (componentes principales, factorial, conglomerados, multidimensional, correspondencia, regresión múltiple, entre otros) que analizan simultáneamente medidas múltiples (más de dos variables) de cada individuo; en sentido estricto, son una extensión de los análisis univariados (análisis de distribución) y bivariados (clasificaciones cruzadas, correlación, análisis de varianza y regresiones simples), que se consideran como tal, si todas las variables son aleatorias y están intercorrelacionadas (Franco, 2003).

Bech (2019) sostiene que el objetivo del análisis multivariado es proporcionar métodos cuya finalidad es el estudio de datos multivariantes que el análisis estadístico uni y bidimensional es incapaz de conseguir. Por ejemplo, el análisis de componentes principales, análisis clúster, análisis discriminante y análisis de regresión y correlación múltiple.

2.2.7 ¿Qué es un análisis de componentes principales?

La técnica del análisis de componentes representa a un conjunto numeroso de caracteres mediante un número reducido de variables hipotéticas, llamadas componentes principales, los cuales no están correlacionados entre sí y, por lo tanto, se interpretan independientemente unos de otros; además, el número de estos depende del número de caracteres originales, y su número máximo posible es igual o menor al número de estos últimos; no obstante, cada componente contiene una parte

de la variabilidad total de los caracteres en diferente proporción (Crisi, 1983).

Franco (2003) manifiesta que el análisis de componentes principales se basa en la transformación de un conjunto de variables cuantitativas originales en otro conjunto de variables independientes no correlacionadas, llamadas componentes principales, los cuales deben ser interpretados independientemente unos de otros, ya que contienen una parte de la varianza que no está expresada en otro componente principal.

León et al. (2008) mencionan que el análisis de componentes principales es una técnica estadística de análisis multivariado que permite seccionar la información contenida en un conjunto de “p” variables de interés en “m” nuevas variables independientes; con lo cual, cada una explica una parte específica de la información, y mediante combinación lineal de las variables originales otorgan la posibilidad de resumir la información total en pocas componentes que reducen la dimensión del problema; así mismo, se emplea con frecuencia cuando se desea dividir las unidades experimentales en subgrupos de acuerdo con la similaridad de los mismos.

Camacho (2010) sostiene que el análisis de componentes principales reduce la dimensionalidad y muestra los diferentes componentes básicos, que son denominados componentes principales; por lo que, cada componente principal es descrito en términos de nuevos componentes, que son definidos como una combinación lineal de las variables originales; en consecuencia, el primer componente, asociado con el mayor autovalor, representa el valor máximo del total de la varianza y el segundo componente es la segunda combinación lineal, no correlacionado con el primero, que representa la máxima varianza residual, y así sucesivamente, hasta contabilizar

totalmente la varianza. Del mismo modo Cortés et al. (2013) lo definen de forma similar como una técnica multivariada que utiliza combinaciones lineales para reducir la dimensionalidad de los datos, transformando las variables originales en un conjunto de variables no correlacionadas entre sí, que se denominan componentes principales; por lo tanto, el primer componente se encuentra asociado con el autovalor mayor y tiene la mayor varianza; el segundo explica la mayor varianza no explicada por el primer componente y así sucesivamente para los demás componentes; por lo que, es conveniente que un número pequeño de componentes explique gran porcentaje de la varianza total, lo cual indica que el conjunto de datos es descrito en un espacio dimensional menor.

Por su parte Gonzales et al. (2011) indican que en el análisis de componentes principales se maneja un número p ($p \geq 2$) de variables numéricas; si cada variable se representa sobre un eje se necesitaría un sistema de coordenadas rectangulares con p ejes perpendiculares entre sí para ubicar las coordenadas de los puntos y poderlos dibujar; cuando $p \geq 4$ para el ser humano es imposible hacer la representación gráfica; en esos casos el análisis de componentes principales permite buscar un nuevo sistema de coordenadas con origen en el centro de gravedad de la nube de puntos de tal manera que el primer eje del nuevo sistema F_1 , recoja la mayor cantidad posible de información.

Por último Gómez y hoyos (2020) indican que el análisis de componentes principales es una técnica multivariada que utiliza combinaciones lineales para reducir la dimensionalidad de los datos, transformando las variables originales en un conjunto de variables no correlacionadas entre sí, que se denominan componentes principales;

por lo que, para hacer el uso de este análisis se necesita que la información esté en forma de una matriz de datos con variables, donde cada variable es una columna y cada medida de esa variable sea una fila, con lo cual es posible correr algoritmos en diferentes programas.

2.2.8 Utilidad del análisis multivariado y de componentes principales en estudios de suelos

El análisis multivariado es una herramienta estadística que se utiliza para evaluar la calidad del suelo, y el análisis de componentes principales para determinar indicadores de calidad del suelo (Navarro et al. 2008). En otra investigación, Portillo (2015) justifica que para la implementación del análisis multivariado, como primer paso se realiza un análisis de correlaciones para determinar el grado de asociación entre las variables, y donde se logre evidenciar la existencia de muchas correlaciones estadísticamente significativas superiores al valor $> 0,8$. Por su parte Da costa (2016) realizó el análisis multivariado para identificar las similitudes que existen entre los indicadores evaluados en varias parcelas y así reducir el número de indicadores que influyen más en la calidad de los suelos. En tanto que Barrezueta et al. (2017) realizaron un análisis de componentes principales a las propiedades físicas y químicas del suelo, para seleccionar los indicadores que expliquen al menos un 80 % de la variabilidad total de los datos.

Febles et al. (2011) sostienen que el análisis multivariado y de componentes principales se usa para determinar los indicadores que mayor explican una variabilidad entre las propiedades físicas y químicas del suelo. Por su parte Castillo et al. (2021) indican que se aplica un análisis de componentes principales a varias propiedades

físicas, químicas y biológicas del suelo, para seleccionar aquellas representativas del conjunto que expliquen mejor la variabilidad y características del suelo.

Cortés et al. (2013) con el objetivo de evaluar un procedimiento para caracterizar adecuadamente la variabilidad vertical y horizontal de la compactación de suelos agrícolas mencionan que la estadística multivariada permite la agrupación de datos en pocos intervalos significativos, a través de análisis de componentes principales, lo cual facilita la identificación de correlaciones de la resistencia a la penetración a diferentes profundidades o entre puntos muestreados en el espacio, eliminando así, la redundancia resultante del análisis de los datos por separado.

Para estudios relacionados con la fertilidad y degradación del suelo, Estrada et al. (2017) mencionan que un análisis de componentes principales ayuda a identificar los indicadores de calidad del suelo más sensibles o aquellos que tienen mayor impacto sobre la calidad del suelo, lo cual implica la evaluación de las propiedades físicas, químicas y biológicas.

Gómez y Hoyos (2020) mencionan que el análisis de componentes principales ha sido aplicado en la caracterización de sistemas de producción agrícola, en el uso de información climática, evaluación de suelos productivos, determinación de áreas homogéneas de precipitación, en la distribución espacial de la lluvia y en sistemas de producción agropecuaria. Así mismo Cortés et al. (2013) añaden que, por la facilidad para incluir conjuntamente un alto número de variables, estos métodos multivariados son aplicados para clasificar, modelar y evaluar resultados de estudios ambientales y de producción agrícola.

2.2.9 Definición de términos básicos

2.2.9.1 Acidez de cambio. Es la capacidad de iones hidrogeniones (H^+) que se encuentran adsorbidos en los coloides del suelo y que están en equilibrio con los que se encuentran en la solución del suelo y con los restantes iones (Carbonera 1984). Para Encina (2017) es la acidez reemplazable y está asociado al Al^{3+} intercambiable, y al ion H^+ que están presentes en gran cantidad en el suelo ácido.

2.2.9.2 Aluminio cambiante. Forma parte de la acidez intercambiable del suelo junto con el ion hidrógeno, los cuales causan una disminución en el pH (Oliva 2009). Para Encina (2017) son los cationes Al^{3+} adsorbidos al complejo coloidal, que al ser desplazados de los minerales arcillosos e hidrolizarse libera iones H^+ contribuyendo a la acidez del suelo.

2.2.9.3 Calcio cambiante. Es la cantidad de calcio adsorbido en el complejo de cambio (Carbonera 1984).

2.2.9.4 Calcáreo total. Expresa la cantidad de minerales de $CaCO_3$ y $CaMg(CO_3)_2$ que están presentes en el suelo (Bazán 2017).

2.2.9.5 Cambisol dístrico. Suelo que tiene una saturación con bases (por NH_4OAc 1 M) menor de 50 % en la mayor parte entre 20 y 100 cm de la superficie del suelo o entre 20 cm y roca continua o una capa cementada o endurecida (WRB 2006).

2.2.9.6 Cambisol éutrico. Suelo que tiene una saturación con bases (por NH_4OAc 1 M) de 50 % o más en la mayor parte entre 20 y 100 cm de la superficie del suelo, o entre 20 cm y roca continua o una capa cementada o endurecida, o en una capa de 5 cm o más de espesor, directamente encima de roca continua si esta comienza dentro de 25 cm de la superficie del suelo (WRB 2006).

2.2.9.7 Cambisol húmico. Suelo que tiene un alto contenido de carbono orgánico en la fracción tierra fina, 1 % o más de carbono orgánico en la fracción tierra fina hasta una profundidad de 50 cm desde la superficie del suelo mineral (WRB 2006).

2.2.9.8 Capacidad de cambio catiónico. Es una medida de cantidad de cargas negativas presentes en las superficies de los minerales y componentes orgánicos del suelo (arcilla, materia orgánica o sustancias húmicas) y representa la cantidad de cationes que las superficies pueden retener: Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ , K^+ , NH_4^+ , etc. (FAO 2020).

2.2.9.9 Conductividad eléctrica. Es una expresión numérica de la capacidad de una solución que contiene sales para transportar la corriente eléctrica, y se expresa en $\mu\text{mohs/cm}$ (Bazán 2017).

2.2.9.10 Entisoles. Este grupo de suelos caracterizado por la incipiente formación del suelo se correlacionan con regosoles o umbrisoles (Soil Survey Staff 2014).

2.2.9.11 Fósforo disponible. Corresponde a una fracción del fósforo total contenido en el suelo, reflejando parte del fósforo de la solución del suelo y aquella que se encuentra en la fase sólida, susceptible de ser asimilada por la planta (Rojas 2001).

2.2.9.12 Inceptisoles. Suelo que tienen un horizonte cámbico que está dentro de los 100 cm de la superficie del suelo y tiene un límite inferior a una profundidad de 25 cm o más debajo de la superficie del suelo mineral. Así es como reciben esta denominación los suelos cambisoles (Soil Survey Staff 2014).

2.2.9.13 Leptosoles. Comprenden suelos muy delgados sobre roca continua y suelos que son extremadamente ricos en fragmentos gruesos (WRB 2015).

2.2.9.14 Magnesio cambiabile. Es la cantidad de magnesio que se encuentra en el complejo coloidal, el cual conjuntamente con el magnesio de la solución conforman el magnesio disponible (Carbonera 1984).

2.2.9.15 Materia orgánica. Forma parte del complejo coloidal, y al descomponerse, generalmente posee grupos funcionales, tales como: carboxilos, fenoles, enoles y aminas; cuya proporción depende de su grado de descomposición, por lo que, está relacionada con el pH del suelo y la relación C / N (Carbonera 1984).

2.2.9.16 Nitrógeno total. Es el porcentaje en peso de nitrógeno orgánico y amoniacal, considerando a los nitratos y nitritos que representan una pequeña fracción (Bazán 2017).

2.2.9.17 pH. El potencial de hidrógeno determina el grado de adsorción de iones (H^+) por las partículas del suelo e indica si un suelo está ácido o alcalino; es el indicador principal en la disponibilidad de nutrientes para las plantas, influyendo en la solubilidad, movilidad, disponibilidad de otros constituyentes y contaminantes inorgánicos presentes en el suelo (FAO 2020).

2.2.9.18 pH actual. Es la cantidad de iones H_3O^+ presentes en la solución del suelo en un instante dado, en equilibrio con las especies que lo han liberado y con los otros iones de la solución (Carbonera 1984). Para Encina (2017) expresa la concentración de iones H^+ actualmente disociados en la solución del suelo.

2.2.9.19 pH potencial. Se refiere a la cantidad total de iones hidrógeno existentes en el suelo susceptibles de ser neutralizados por una base (Carbonera

1984). Según Encina (2017) corresponde a los iones H^+ de cambio adsorbidos (o al Al^{3+} que libera iones H^+) que se disocian progresivamente en la solución suelo.

2.2.9.20 Phaeozem. Caracterizado por poseer suelo superficial oscuro, sin carbonatos secundarios (a menos que estén muy profundos) y alta saturación de bases; además, son suelos porosos, fértiles y excelentes tierras de cultivo (WRB, 2015).

2.2.9.21 Phaeozem calcárico. Es un phaeozem donde se ha acumulado $CaCO_3$ secundario o bien solo en forma de partículas finas de 1 mm o menos, dispersados en la matriz como concentraciones discontinuas; la acumulación puede estar en material originario, en horizontes subsuperficiales o superficiales como resultado de la erosión (WRB 2015).

2.2.9.22 Phaeozem lúvico. Son suelos que tiene un horizonte árgico con una C.I.C., igual o mayor de 24 cmolc kg^{-1} de arcilla en todo su espesor, y una saturación con bases (por NH_4OAc 1 M) de 50 % o más en todo el espesor del horizonte hasta una profundidad de 100 cm desde la superficie del suelo (WRB 1999).

2.2.9.23 Phaeozem háplico. Son suelos que tienen una expresión típica de ciertos rasgos, típica en el sentido de que no hay caracterización ulterior o significativa (WRB 2006).

2.2.9.24 Potasio cambiabile. Una forma del potasio en el suelo que depende del contenido en arcilla y materia orgánica del suelo, es decir de su capacidad de intercambio catiónico, no superando en general el 5 % de esta capacidad (Carbonera 1984).

2.2.9.25 Potasio disponible. Es una fracción pequeña del potasio total y es la más fácilmente aprovechable por las plantas, está en equilibrio con el potasio

cambiable (Carbonera 1984).

2.2.9.26 Regosoles. Son suelos que se forman sobre materiales no consolidados y se encuentran dentro de los suelos más fértiles por lo que su principal uso es agrícola, suelo con ningún desarrollo significativo de perfil (WRB, 2015).

2.2.9.27 Regosol calcárico. Suelos que presentan calcáreo por lo menos entre 20 y 50 cm desde la superficie del suelo o entre 20 cm y roca continua o una capa cementada o endurecida, lo que esté a menor profundidad (WRB 2006).

2.2.9.28 Saturación de bases. En el suelo se encuentran los cationes ácidos (hidrógeno y aluminio) y los cationes básicos (calcio, magnesio, potasio y sodio); la fracción de los cationes básicos que ocupan posiciones en los coloides del suelo se refiere al porcentaje de saturación de bases (FAO 2020).

2.2.9.29 Sodio cambiabile. Es la cantidad de sodio que se encuentra en el complejo coloidal (Carbonera 1984).

2.2.9.30 Vertisoles. Suelos que después de mezclar los 18 cm superficiales, tienen más de 30 % de arcilla; durante los periodos secos en el transcurso del año presentan grietas o rajaduras de hasta 1 cm de ancho y 50 cm de profundidad; suelos con enraizamiento limitado, condiciones alternas de sequía - humedad, arcilla de expansión - retracción (WRB 2015).

2.2.9.31 Vertisol crómico. La mayor parte del horizonte B tiene un matiz de 7,5 YR y una pureza en húmedo mayor de 4, o un matiz más rojo que 7,5 YR (WRB 2006).

2.2.9.32 Vertisol pélico. Presenta en la matriz del suelo, de los 30 cm superiores, una intensidad de color en húmedo de 3,5 o menos y una pureza de 1,5 o menor (FAO 1999).

CAPÍTULO III

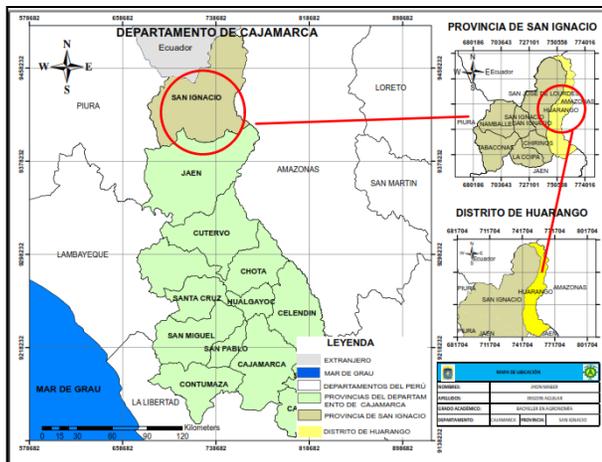
MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Localización de la investigación

El distrito de Huarango es uno de los siete distritos de la provincia de San Ignacio, ubicada en el departamento de Cajamarca; limita por el norte y por el este con la provincia de Bagua de la región de Amazonas, por el sur con los distritos Santa Rosa y Bellavista de la provincia de Jaén, y por el oeste con los distritos San José de Lourdes y Chirinos (Figura 1).

Figura 1

Ubicación geográfica del distrito de Huarango - San Ignacio



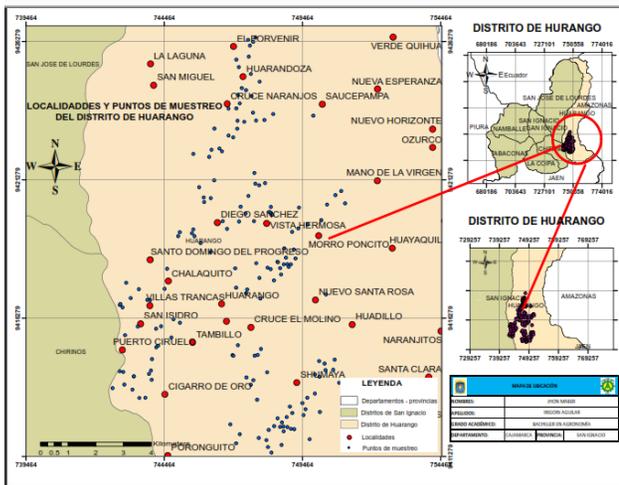
Nota. Elaboración propia – Programa ArcGIS 10.5.

La investigación se realizó en un área aproximada de 6 315,93 ha (área que comprende la distribución de todos los puntos de muestreo) que abarca a varias localidades del distrito de Huarango. Los puntos rojos muestran a las localidades de intervención: El Porvenir, Huarandoza, Cruce Naranjos, Saucepampa, Diego Sánchez, Vista Hermosa, Santo Domingo de Progreso,

Morroponcito, Chalaquito, Villas Trancas, Huarango, San Isidro, Puerto Ciruelo, Cruce El Molino, Tambillo, Cigarro de Oro, Poronguito y Shumaya. Mientras que, los puntos azules indican los lugares en donde se realizaron los muestreos (Figuras 2 y 3).

Figura 2

Localidades y puntos de muestreo del distrito de Huarango



Nota. Elaboración propia – Programa ArcGIS 10.5.

Figura 3

Imagen satelital del área que comprende todos los puntos de muestreo



Nota. Programa AutoCad Civil 3D.

Su clima, es cálido sub húmedo, la zona de vida está representada mayormente (55 %) por bosque seco tropical transicional a bosque húmedo sub tropical (Bs – T / bh - ST), seguido en un 31 % por bosque muy seco tropical (Bms –T), y en un 10 % y 4 % representado respectivamente por (bmh – PT / bh - MT) y (bmh – T). La geología es muy variada, predominan materiales detríticos finos y gruesos derivados de calizas y areniscas (64 %), seguido de areniscas carbonatadas (14 %), materiales calcáreos (11 %), lutitas calcáreas asociadas con areniscas (8 %), depósitos aluviales y areniscas ferruginosas (3 %). (Figuras 21 – 24, ver anexo).

La textura de los suelos, está representada por las siguientes clases texturales: arcilloso (53 %), franco arcillo arenoso (26 %), arcillo arenoso (11 %), franco arcilloso (9 %) y franco arenoso (1 %). Los suelos representativos de la zona en la clasificación FAO son: vertisol crómico (53,18 %), phaeozem lúvico (13,87 %), vertisol pélico (10,98 %), phaeozem háplico (8,67 %), phaeozem calcárico (7,5 %) y entre el cambisol dístrico, eutríco húmico y regosol calcárico (2,89 %); y según la clasificación CUP la clase IV representa el 43,93 %, seguido de la clase VI con el 27,17 %, la clase III con el 21,38 %, la clase VII y VIII con el 5,78 % y el 1,16 % respectivamente (Figuras 20 – 23, ver anexo).

Los cultivos más representativos de la zona son: *Coffea Arabica* L., *Sorghum bicolor* L., *Zea mays* L., *Oryza sativa* L., *Teobroma cacao* L., y en menor grado: *Glycine max* L., *Manihot esculenta* Crantz y *Phaseolus vulgaris* L.; frutales como: *Carica papaya* L., *Inga edulis*, *Musa paradisiaca* L., entre otros. Pero también hay vegetación arbustiva y pastos naturales (Figura 20 – 23, ver anexo).

3.2 Materiales

- Copias de las tarjetas de recolección de información de campo del estudio de suelos del proyecto San Antonio de Huarango (Figuras 20 – 23, ver anexo).
- Copias de los resultados de los 223 análisis de estudio de suelos del proyecto San Antonio de Huarango (Figuras 24 – 26, ver anexo).
- Laptop y Software estadístico.

3.3 Metodología

El presente trabajo se realizó para evaluar los indicadores químicos de calidad en dos tipos de suelos, cultivados y vírgenes; se demostró que a través de un análisis multivariado y de componentes principales se puede facilitar la reducción de una gran cantidad de datos a un grupo menor que representen a la totalidad y en base a estos se pueda tomar decisiones al momento de evaluar la calidad de estos suelos y; además, disminuir el costo en realizar análisis a muchas propiedades químicas al azar. Aportando de este modo con información en la zona; ya que, estudios realizados para evaluar la calidad del suelo, a nivel de sitio específico son escasos.

En este estudio los datos utilizados fueron 16 propiedades químicas, las cuales son las variables en estudio, ya que son usadas con frecuencia para evaluar la calidad del suelo: pH actual, pH potencial, aluminio cambiante, calcáreo total, conductividad eléctrica, materia orgánica, nitrógeno total, fósforo disponible, potasio disponible, capacidad de cambio catiónico, calcio cambiante, magnesio

cambiable, potasio cambiable, sodio cambiable, saturación de bases y acidez cambiable del suelo.

3.3.1 Trabajo en gabinete

Para el siguiente estudio sólo se realizó un trabajo de gabinete debido a que se tuvo la información de campo y la data disponible; para ello se procesó los 223 resultados de análisis de suelos, realizados el 2011, en suelos vírgenes y cultivados de las localidades del distrito de Huarango, en un estudio de suelos del proyecto San Antonio de Huarango.

Los análisis de los suelos fueron realizados en el Laboratorio de Análisis de Suelos y Plantas de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Cajamarca.

3.2.2. Análisis multivariado

En la investigación se usó el método estadístico; un análisis multivariado y de componentes principales para evaluar los indicadores químicos de calidad de los suelos. Lo mostrado en adelante es corrido por algoritmos del software InfoStat.

3.2.2.1 Matriz de variable respuesta. La base para la utilización del análisis de componentes principales es la estructura de correlación (interdependencia) entre las variables cuantitativas definidas en una población, en donde cada individuo queda definido en términos de las mismas. La matriz de variable respuesta de doble entrada X está compuesta por filas que representan las unidades experimentales I_r , $r = 1, 2, \dots, n$ y las columnas, por las variables X_j , $j = 1, 2, \dots, p$, como se muestra a continuación:

$$X = \begin{matrix} & X_1 & X_2 & \cdots & X_p \\ \begin{matrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \cdots & X_{1p} \\ X_{21} & X_{22} & \cdots & X_{2p} \\ X_{r1} & X_{r2} & \cdots & X_{rp} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{n1} & X_{n2} & \cdots & X_{np} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad n \times p$$

X_{rj} : Valores de la r – ésima unidad experimental en la j – ésima variable respuesta.

P: Cantidad de variables

n : individuos o unidades experimentales sobre la cual están midiendo las variables.

3.2.2.2 Vectores de datos. Con el fin de tener un lenguaje común en los procesos del análisis de componentes principales, los vectores siempre serán columnas a o X , etc., y la transpuesta de un vector cualquiera; por ejemplo: a , se simboliza por a' .

3.2.2.3 Vectores de medias y matrices de varianza covarianza. La media de un vector X de variables aleatorias se denota por μ , definido por:

$$\mu = E(X) = \begin{bmatrix} E = (X_1) \\ E = (X_2) \\ \vdots \\ E = (X_p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \\ \vdots \\ \mu_p \end{bmatrix}$$

La matriz de covarianza de X se denota por Σ , donde:

$$\Sigma = cov(X) = E[(X - \mu)(X - \mu)'] = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \cdots & \sigma_{1p} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \cdots & \sigma_{2p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \sigma_{p1} & \sigma_{p2} & \cdots & \sigma_{pp} \end{bmatrix}$$

Con:

$$\sigma_{jj} = \text{Var}(X_j) = E[(X_j - \mu_j)^2], \text{ para } j = 1, 2, \dots, p, \text{ y}$$

$$\sigma_{ij} = \text{Cov}(X_i, X_j) = E[(X_i - \mu_i)(X_j - \mu_j)], \text{ para } i \neq j = 1, 2, \dots, p,$$

3.2.2.4 Correlación y matriz de correlación. El coeficiente de correlación se denota por ρ_{ij} :

$$\rho_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{\sqrt{\sigma_{ii}\sigma_{jj}}}$$

La matriz de correlación para un vector aleatorio X se denota por:

$$\rho = \begin{bmatrix} 1 & \rho_{12} & \dots & \rho_{1p} \\ \rho_{21} & 1 & \dots & \rho_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{p1} & \rho_{p2} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

Para correr los algoritmos en el software se procedió a realizar lo siguiente:

- **Paso 1.** Como paso previo para el procesamiento de datos, se realizó la tabulación de los valores numéricos de las 16 propiedades químicas, de 223 muestras de suelos (Tabla 6, ver Anexo), en la hoja de cálculo de Excel 2018.
- **Paso 2.** Luego se cargó la información al paquete estadístico de InfoStat para su respectivo procesamiento. Las columnas definidas por las 16 propiedades químicas y las filas definidas por los 223 resultados de los análisis de suelos.
- **Paso 3.** Para determinar si existe diferencias significativas entre las propiedades químicas de los suelos vírgenes y cultivados, primero se realizó un análisis de varianza, para determinar si existe significancia estadística al 5 % de probabilidad e indicar que las características tanto en los suelos vírgenes como cultivados son similares o no. Además, se determinó su media, desviación

estándar y coeficiente de variación (Tabla 1).

- **Paso 4.** Para evaluar si existe una correlación y el grado de correlación entre las propiedades analizadas, se realizó un análisis de correlaciones para los suelos vírgenes y los suelos cultivados, y determinar qué propiedades químicas están correlacionadas (Tabla 2 y Tabla 3).

- **Paso 5.** Para evaluar los indicadores químicos de calidad, se realizó un análisis de componentes principales, seleccionándose aquellos indicadores cuyos valores propios expliquen el 70 % o más de la variabilidad, tanto para, los suelos vírgenes, suelos cultivados y agrupados (Tabla 4).

- **Paso 6.** Por último, para indicar la calidad de los suelos se usó una adaptación de la metodología propuesta por (Cantú et al. 2007; Estrada et al. 2017; Prieto 2013; Gómez y Hoyos 2020), que se describe a continuación:

- ✓ **Primero.** Se definió los límites: máximo (I MAX) y mínimo (I MIN) de los indicadores químicos. Para establecer los límites se usó los siguientes criterios: conceptos teóricos, las condiciones ideales para una potencial producción de cultivos en la zona y se hizo uso de fichas técnicas del MIDAGRI.

- ✓ **Segundo.** Los valores determinados fueron normalizados utilizando una escala de 0 a 1, considerando 0 el valor de mínima calidad y 1 el valor de máxima calidad lo cual se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$V_n = \frac{(I_m - I_{MIN})}{(I_{MAX} - I_{MIN})} \quad \dots (1)$$

Donde; V_n: valor normalizado del indicador, I_m: valor experimental del

indicador, I MAX: valor máximo del indicador, I MIN: valor mínimo del indicador.

✓ **Tercero.** Se propuso una escala de 4 clases de calidad para la investigación: (0 – 0,3) baja; (0,31 – 0,6) media; (0,61 – 1) alta; (> 1,1) exceso.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Análisis de varianza para las 16 propiedades químicas

Resultados de los análisis de varianza para las 16 propiedades químicas de los suelos vírgenes y cultivados (Tabla 1), no existe diferencia significativa ($p > 0,05$) para ninguna de las propiedades químicas.

Tabla 1

Análisis de varianza para las 16 propiedades químicas, sus medias, sus desviaciones estándar (entre paréntesis) y su coeficiente de variación (CV).

N°	Propiedades químicas	Suelos		CV (%)
		Suelos vírgenes	Suelos cultivados	
1	pH actual	7,7 (0,74)	7,6 (0,72)	9,5
2	pH potencial	6,3 (0,56)	6,2 (0,55)	8,9
3	Al cambiable (meq/100 g)	-	-	-
4	Calcáreo total (%)	3,9 (2,78)	3,4 (2,54)	73,5
5	Conductividad eléctrica ($\mu\text{mohs/cm}$)	804,4 (574,4)	848,9 (481,6)	59,8
6	Materia orgánica (%)	2,9 (1,01)	3,1 (1,08)	34,4
7	Nitrógeno total (%)	0,20 (0,07)	0,22 (0,07)	34,2
8	Fósforo disponible (ppm)	16,1 (3,13)	15,4 (3,07)	19,8
9	Potasio disponible (ppm)	339,1 (32,9)	334 (41,0)	11,8
10	Capacidad de cambio catiónico (meq/100 g)	28,9 (1,76)	28,6 (3,23)	10,4
11	Calcio cambiable (meq/100 g)	22,9 (3,2)	22,4 (3,9)	16,9
12	Magnesio cambiable (meq/100 g)	2,3 (0,31)	2,2 (0,34)	16,8
13	Potasio cambiable (meq/100 g)	1,14 (0,16)	1,11 (0,19)	16,8
14	Sodio cambiable (meq/100 g)	0,02 (0,69)	0,02 (0,56)	23,9
15	Saturación de bases (%)	91,7 (12,5)	90,1 (13,0)	14,3
16	Acidez cambiable (meq/100 g)	2,5 (3,71)	2,8 (3,52)	31,19

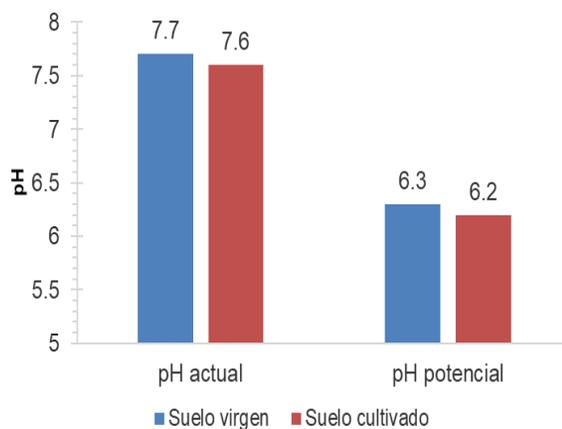
Al aluminio cambiante no se le hizo el análisis porque solo 4 de las 223 muestras de los análisis de suelos tienen valores diferentes de 0.

A continuación, se describen los resultados de cada propiedad química analizada.

4.1.1 pH del suelo

Figura 4

El pH potencial y actual de los suelos vírgenes y cultivados



El pH actual y potencial promedio de los suelos vírgenes fue (7,7 y 6,3 respectivamente), superior al pH actual y potencial promedio de los suelos cultivados (7,6 y 6,2 respectivamente). Puede deberse a que son manejados con enmiendas orgánicas y parte de fertilizantes químicos que tienen un efecto neutralizante y pueden conllevar a la disminución del pH.

En otros estudios Paula et al. (2015) determinaron que para el pH actual en los suelos vírgenes que van desde (5,10 a 6,20) fue ligeramente mayor al pH de los suelos cultivados que van desde (4,73 a 5,97); además mencionan que los valores no se elevaban a pesar de que en estos se aplicaba enmiendas calcáreas, y explican que podría deberse a la reactividad del calcáreo. Del mismo modo, Da

Costa (2016) comparando diferentes suelos cultivados con un suelo virgen, determinó que sí hay diferencias significativas entre unas comparaciones y no las hay en otras comparaciones tanto para la acidez actual y potencial; arrojó resultados para el suelo virgen con pH actual de (6,4) y pH potencial (5,3); y para los suelos cultivados con pH actual que van desde (6,0 a 6,6) y pH potencial que van desde (5,3 a 5,7); además añaden que el pH (6,6) en un suelo cultivado, posiblemente se deba a que se realizaba la quema de vegetación año tras año, lo cual posiblemente se deba a las bases añadidas a través de las cenizas a lo largo de tiempo.

El pH del suelo tiende a cambiar por la absorción de los cationes básicos por los cultivos, ya que al absorber estos libera hidrógeno para mantener el equilibrio en su interior, así mismo la elevada precipitación ocasiona la lixiviación de cationes intercambiables, la descomposición de la materia orgánica que genera la liberación de CO₂, luego este transformado en HCO₃ que libera iones H⁺ incrementa la acidez del suelo (Gómez y Hoyos 2020).

4.1.2 Aluminio del suelo

No se realizó el análisis de varianza porque solo se tuvo 5 muestras con presencia de aluminio; arrojaron valores entre (8,86 a 19,48 meq/100 g). Posiblemente se determina aluminio en esas muestras porque entre ellas tienen el pH menor a 5,3; se confirmaría que se encuentre aluminio a ese pH; ya que, en su investigación Encina (2017) menciona que a un pH sobre 5,3 se inicia la formación de Al(OH)₃ que se precipita, eliminando el aluminio de la solución. Además, añade que la toxicidad del aluminio incluye varios aspectos que afectan el normal

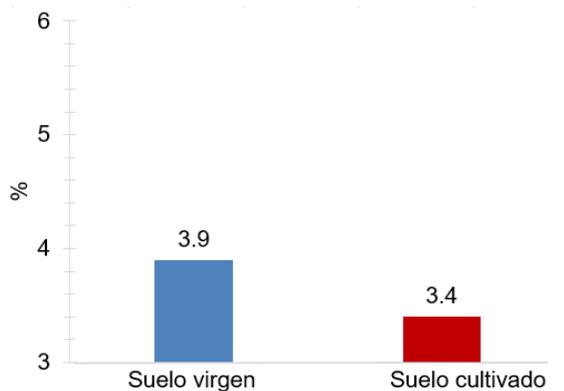
desarrollo de las plantas sensibles a la acidez, lo que reduce su crecimiento y desarrollo; y su alta concentración inhibe la absorción de calcio y magnesio.

En otras investigaciones, Da Costa (2016) no encontró significancia estadística para el contenido de aluminio entre un suelo virgen y varios cultivados; mostrando resultados del contenido de aluminio en el suelo virgen de (0,4 meq/100 g), siendo mayor su concentración en todos los suelos cultivados a excepción de uno con valores que van desde (0,2 a 0,4 meq/100 g); además mencionan que el aluminio puede llegar a ser tóxico cuando el pH es menor a 5, pero también su presencia puede ser beneficiosa para reducir una posible toxicidad de calcio y magnesio que son altos.

4.1.3 Calcáreo total

Figura 5

Calcáreo total de los suelos vírgenes y cultivados.



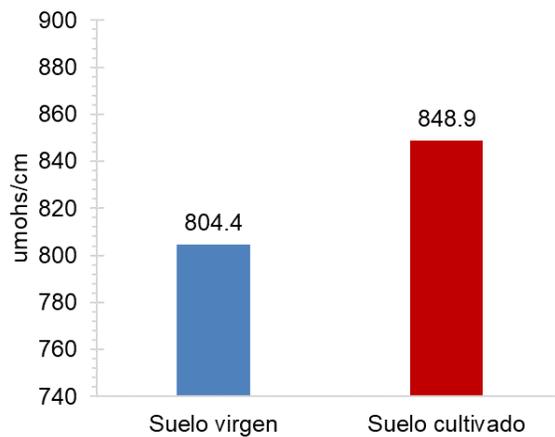
El calcáreo total promedio (Figura 5) en los suelos vírgenes fue (3,9 %), siendo más alto que en los suelos cultivados con (3,4 %); esta disminución en los suelos cultivados puede deberse a su transformación progresiva y asimilación por los cultivos a través del tiempo. Así, por ejemplo; en su investigación Encina

(2017) menciona que cuando el CaCO_3 reacciona con el agua libera iones Ca^{2+} , HCO_3^- y OH^- , con los iones hidroxilos neutraliza los iones H^+ en la solución del suelo y se incrementa el intercambio de los iones calcio y su solubilidad. Por otra parte, Paula et al. (2015) mencionan que cuando el suelo no es arado y contiene calcáreo calcítico dolomítico (45 % de CaCO_3 y entre 20 a 40 % de MgO), puede neutralizar la acidez a través de la formación y la migración de $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ y $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ hacia las capas más profundas del suelo y las partículas de calcáreo se desplazan por los canales intactos de las raíces muertas hacia las capas más profundas.

4.1.4 Conductividad eléctrica

Figura 6

Conductividad eléctrica de los suelos vírgenes y cultivados



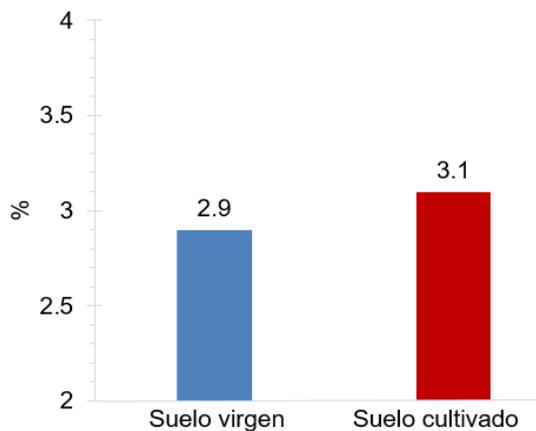
La conductividad eléctrica promedio (Figura 6) en los suelos vírgenes fue (804,4 $\mu\text{mohs}\cdot\text{cm}^{-1}$), fue inferior a la de los suelos cultivados con (848,9 $\mu\text{mohs}\cdot\text{cm}^{-1}$); esta diferencia puede deberse a que los suelos cultivados al manejarlos con fertilizantes potásicos constantemente, aumenta el contenido de sales y la conductividad eléctrica en el suelo. Resultados similares obtuvieron en

su investigación Campitelli et al. (2010), compararon un suelo virgen y varios suelos cultivados; el resultado para el suelo virgen fue (0,42 ds m-1) y para los suelos cultivados estuvieron en un rango desde (0,35 a 0,68 ds m-1); además determinó significancia estadística ($p < 0,05$).

4.1.5 *Materia orgánica*

Figura 7

Materia orgánica de los suelos vírgenes y cultivados



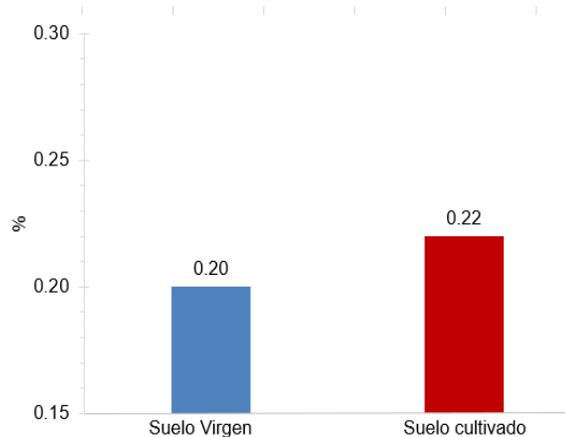
La materia orgánica promedio (Figura 7) en los suelos vírgenes (2,9 %) fueron inferiores al de los suelos cultivados (3,1 %). La diferencia puede deberse a que, los suelos al poseer un pH tendiente a la alcalinidad y un alto contenido de carbonatos, parte de la actividad microbiana está limitada a descomponer los restos orgánicos que se van acumulando en la superficie del suelo por su lenta descomposición; en cambio al empezar a cultivar los suelos y proporcionando enmiendas orgánicas y fertilizantes, el pH del suelo empezaría a tender a la neutralidad propiciando un mejor ambiente para la actividad microbiana que podría acelerar la descomposición de los restos vegetales y aumentar el contenido de la materia orgánica en el suelo.

En contraste a lo mencionado, Villareal (2013) indica que la disminución de la materia orgánica en suelos cultivados puede deberse a la baja actividad biológica y escasa biomasa microbiana. Del mismo modo Paula et al. (2015) determinaron que la materia orgánica en suelos vírgenes fue (3,27 %), siendo mayor con el contenido en los suelos cultivados con (2,07 %), y añade que arrojó estos valores a pesar de aplicar abonos orgánicos como: guano de aves, de bovino y plantas de cobertura. Así mismo Da Costa (2016) también menciona que la materia orgánica reduce los impactos negativos que puedan surgir del manejo intensivo y sucesivo en los suelos cultivados; no así en los suelos vírgenes, donde hay las mayores tasas de acumulación y descomposición de material orgánico a través del tiempo; además, la materia orgánica puede reducir el efecto negativo del aluminio en el perfil del suelo, ya que aumenta la cantidad de cargas negativas promoviendo la reducción por lixiviación de cationes.

4.1.6 Nitrógeno total

Figura 8

Nitrógeno total de los suelos vírgenes y cultivados



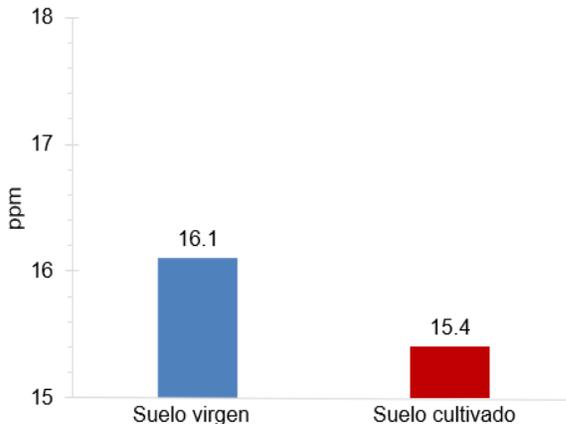
El nitrógeno total promedio (Figura 8) en los suelos vírgenes fue (0,20 %), ligeramente inferior al nitrógeno total de los suelos cultivados con (0,22 %). Este resultado se puede discutir de manera análoga que en el determinado para la materia orgánica; los suelos al ser cultivados, y ser incorporados constantemente con abonos, fuente potencial de nitrógeno, éstos al ser descompuestos liberan el nitrógeno en el suelo, aumentando su concentración. Así mismo Paula et al. (2015) mencionan que la materia orgánica contribuye a limitar las pérdidas de nitrógeno por lixiviación aumentando sus niveles.

En otra investigación Campitelli et al. (2010) comparando un suelo virgen y varios suelos cultivados; el resultado para el suelo virgen fue (2,17 %) y para los suelos cultivados estuvieron en un rango desde (1,17 a 1,90); además determinó significancia estadística ($p < 0,05$).

4.1.7 Fósforo disponible

Figura 9

Fósforo disponible de los suelos vírgenes y cultivados



El fósforo disponible promedio de los suelos vírgenes fue (16,1 ppm) es superior al de los suelos cultivados con (15,4 ppm). La disminución de fósforo disponible en los suelos cultivados posiblemente se deba a la extracción de este por los cultivos y no reponer al suelo lo extraído. Resultado similar determinaron en su investigación Campitelli et al. (2010) donde comparando suelos cultivados y un suelo virgen, el fósforo extractable (entre 29,35 – 32,50 mg kg⁻¹) en suelos cultivados fue menor al del suelo virgen (41,35 mg kg⁻¹); además determinaron significancia estadística ($p < 0,05$).

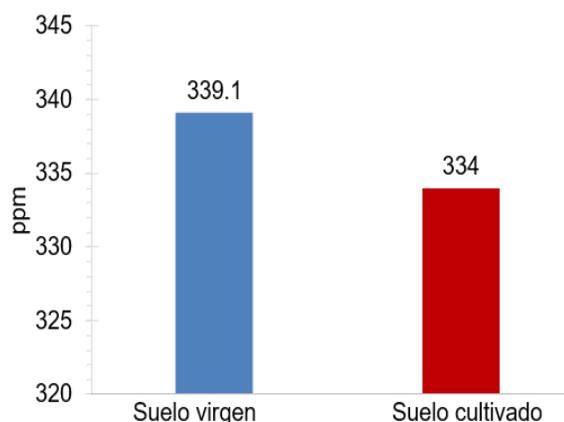
En otras investigaciones se determinaron resultados contrarios; por ejemplo, Casalinho et al. (2007) determinaron que el fósforo en los suelos vírgenes (4,68 ppm), fue inferior al fósforo determinado en los suelos cultivados con diferentes años de manejo con valores de 37,33 a 49,35 ppm. Del mismo modo Paula et al. (2015) determinaron que el fósforo en los suelos vírgenes fue

(16,26 mg·m⁻³) inferior al de suelos cultivados con (31,50 mg·m⁻³), y explican que su efecto residual de las aplicaciones de fertilizantes fosfatados, y la práctica de cultivo verde (arveja), en suelos cultivados a lo largo de los años contribuyó al aumento del contenido de fósforo en el suelo.

4.1.8 Potasio disponible

Figura 10

Potasio disponible de los suelos vírgenes y cultivados



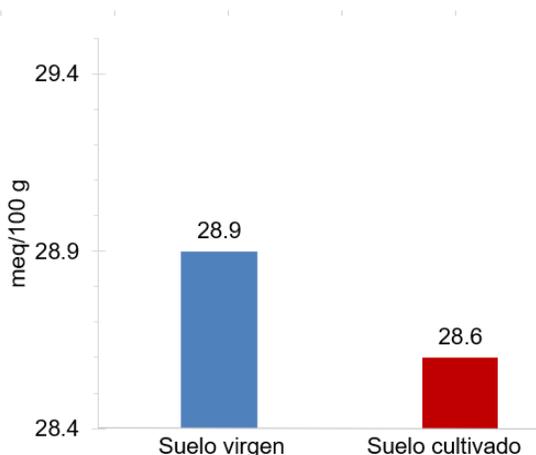
El potasio disponible promedio (Figura 10) de los suelos vírgenes fue (339,1 ppm) es mínimamente superior al de los suelos cultivados (334 ppm). Del mismo modo que para el fósforo; la disminución de potasio en los suelos cultivados posiblemente se deba a la extracción de este por los cultivos.

En otra investigación Paula et al. (2015) obtuvieron resultados similares, en suelos vírgenes el potasio disponible fue (257,80 mg·m⁻³), mayor que en los suelos cultivados con (109,73 mg·m⁻³); mencionan que, a pesar de la incorporación sistemática de fertilizantes y potasio de alta solubilidad, cenizas y práctica de cultivo de cobertura a través de los años, el potasio fue inferior en los suelos cultivados.

4.1.9 Capacidad de cambio catiónico

Figura 11

Capacidad de cambio catiónico de los suelos vírgenes y cultivados



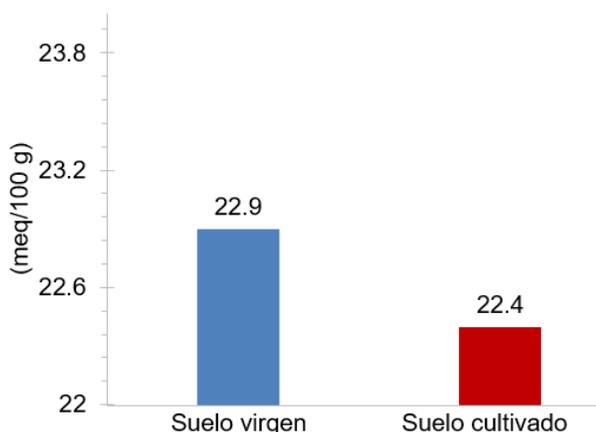
El contenido de la capacidad de cambio catiónico promedio (Figura 11) en los suelos vírgenes fue (28,9 meq/100 g) es aproximadamente igual al de los suelos cultivados con (28,6 meq/100 g). La disminución de la capacidad de cambio catiónico en el suelo cultivado resultó ligeramente inferior a pesar de que en estos suelos la materia orgánica aumentó, siendo ésta quien contribuye al aumento de la capacidad de intercambio catiónico. Por ejemplo, García et al. (2012) mencionan que el incremento en 1 % de la materia orgánica en el suelo incrementa en 2 meq/100 g la capacidad de cambio catiónico. Así mismo Da Costa (2016) menciona que la materia orgánica del suelo eleva la capacidad de cambio catiónico por presentar grupos funcionales eléctricamente negativos y pone a disponibilidad los nutrientes en el suelo. Demostrando en sus resultados que la capacidad de cambio catiónico en suelos vírgenes (18,37 meq/100 g) fue superior a suelos cultivados (12,48 meq/100 g). Así mismo, (Paula et al. 2015) determinaron que la capacidad de cambio catiónico en suelos vírgenes fue (17,23

meq/100 g) superior al de los suelos cultivados con (9,91 meq/100 g).

4.1.10 Calcio cambiante

Figura 12

Calcio cambiante de los suelos vírgenes y cultivados

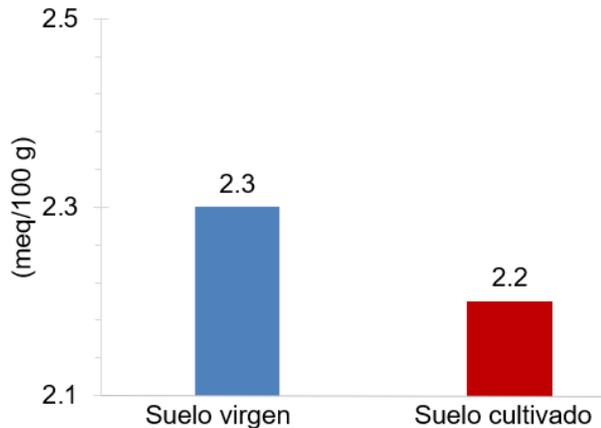


El calcio cambiante promedio (Figura 12) en los suelos vírgenes fue (22,9 meq/100 g) es aproximadamente igual al de los suelos cultivados (22,4 meq/100 g). La ligera disminución se debe posiblemente al cambio de este por otro catión en el complejo coloidal, pasando a la solución del suelo para ser asimilado por los cultivos o lavado por las precipitaciones; otra opción para explicar la ligera disminución podría ser que los suelos al poseer minerales calcáreos estos van incorporándose progresivamente al complejo coloidal. Resultado similar obtuvieron Paula et al. (2015), determinaron que el calcio cambiante en suelos vírgenes (9,18 meq/100 g) fue mayor al de los suelos cultivados (4,68 meq/100 g). En cambio, Da Costa (2016) determinó que el (calcio + magnesio) cambiante en suelos vírgenes fue (15,23 meq/100 g), inferior al de los suelos cultivados (21,83 meq/100 g).

4.1.11 Magnesio cambiabile

Figura 13

Magnesio cambiabile de los suelos vírgenes y cultivados



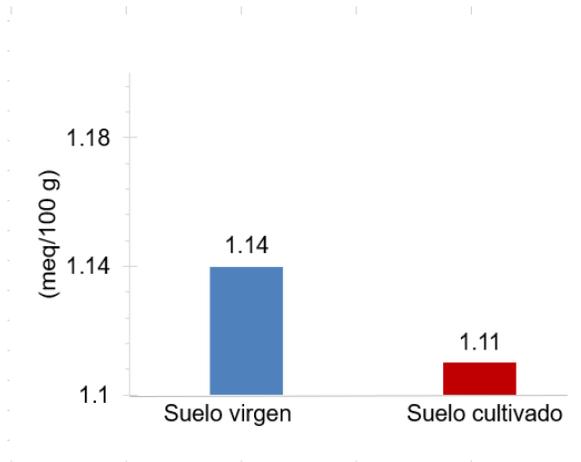
El magnesio cambiabile promedio (Figura 13) en los suelos vírgenes fue (2,3 meq/100 g) es ligeramente superior al de los suelos cultivados con (2,2 meq/100 g). Su ligera disminución posiblemente se deba a las mismas razones explicadas anteriormente que para el calcio; ya que tanto el calcio como el magnesio tienen una correlación fuerte y positiva con la capacidad de cambio catiónico, esto se demuestra más adelante en el análisis de correlaciones.

Resultado similar obtuvieron Paula et al. (2015) determinaron que el magnesio cambiabile en suelos vírgenes fue (2,30 meq/100 g), superior al de los suelos cultivados con (1,11 meq/100 g), obteniendo la misma tendencia que con el calcio; explicando los autores que este valor posiblemente se deba a que los niveles de abonamientos y de encalado en los suelos cultivados son más bajos que las dosis recomendadas.

4.1.12 Potasio cambiabile

Figura 14

Potasio cambiabile de los suelos vírgenes y cultivados



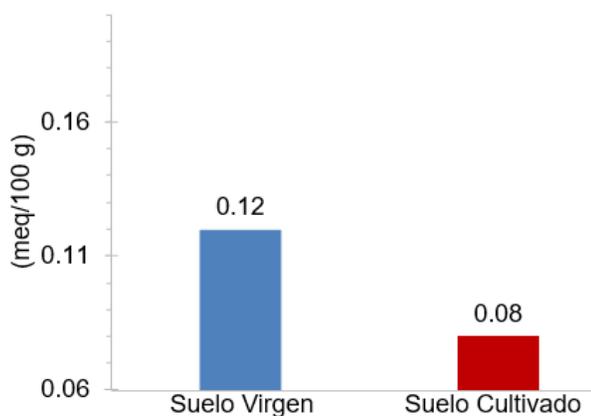
El contenido de potasio cambiabile promedio (Figura 14) en los suelos vírgenes fue (1,14 meq/100 g) aproximadamente igual al de los suelos cultivados (1,11 meq/100 g). De la misma forma que la disminución para el calcio y el magnesio, este elemento es adsorbido por el complejo coloidal, retirado o extraído hacia la solución del suelo para ser asimilado por los cultivos, siendo este uno de los elementos mayores y su alto requerimiento por los cultivos disminuiría su concentración si no es repuesto periódicamente.

En otra investigación Da Costa (2016) obtuvo resultados diferentes, determinó que el potasio cambiabile en los suelos vírgenes fue (0,133 meq/100 g), inferior a los valores en algunos suelos cultivados con (0,202 meq/100 g), obteniendo la misma tendencia que con el calcio y magnesio cambiabiles.

4.1.13 Sodio cambiabile

Figura 15

Sodio cambiabile de los suelos vírgenes y cultivados

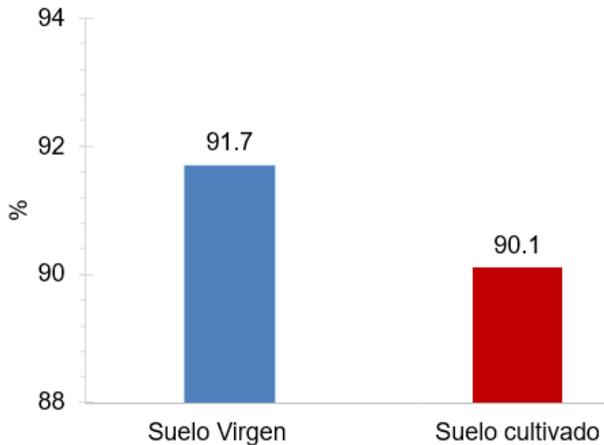


El contenido de sodio cambiabile promedio (Figura 15) en los suelos vírgenes fue (0,12 meq/100 g), siendo superior al de los suelos cultivados con (0,08 meq/100 g). La disminución del sodio cambiabile en los suelos cultivados posiblemente se deba al cambio de esta base por otras bases cambiables o su disminución al ser lavado por las precipitaciones. Ya que, como menciona Carbonera (1984), es la cantidad de sodio que se encuentra en el complejo coloidal. Entonces al ser cultivados los suelos posiblemente se cambie este elemento por otras bases de cambio. Resultados similares obtuvieron Paula et al. (2015), en suelos vírgenes determinaron que el sodio fue ($20,0 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$), superior al de los suelos cultivados con ($9,53 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$). Así mismo, Da Costa (2016) determinó que el sodio cambiabile en los suelos vírgenes fue (0,019 meq/100 g), superior al de los suelos cultivados con (0,012 meq/100 g).

4.1.14 Saturación de bases

Figura 16

Saturación de bases de los suelos vírgenes y cultivados

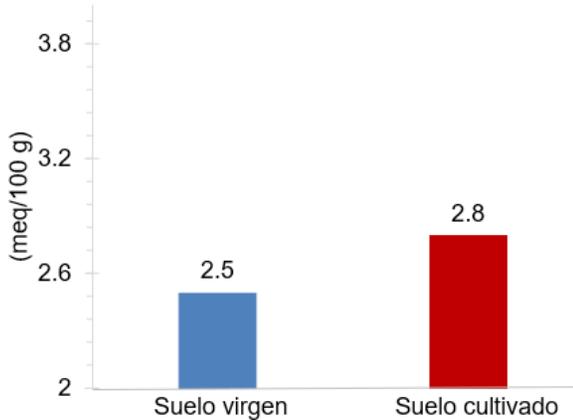


La saturación de bases promedio (Figura 16) en los suelos vírgenes fue (91,7 %), superior a la de los suelos cultivados con (90,1 %), la disminución de la saturación de bases en el suelo cultivado posiblemente se deba al desplazamiento de las bases del complejo coloidal y extracción de estas por los cultivos. FAO (2020) indica que la suma de las bases de cambio (calcio, magnesio, potasio y sodio) determina la saturación de bases. En los resultados anteriores las bases en los suelos cultivados disminuyeron, por lo que, se espera que la saturación de bases también disminuya. Resultados similares obtuvieron Paula et al. (2015), determinaron que la saturación de bases en los suelos vírgenes fue (65,80 %), superior al de los suelos cultivados con (59,53 %). Del mismo modo Da costa (2016) determinó que la saturación de bases en los suelos vírgenes fue (83,43 %) superior a los valores determinados en los suelos cultivados (80,30 %).

4.1.15 Acidez cambiabile

Figura 17

Acidez cambiabile de los suelos vírgenes y cultivados



La acidez cambiabile promedio (Figura 17) de los suelos vírgenes fue (2,5 meq/100 g) y de los suelos cultivados fue (2,8 meq/100 g). El aumento de la acidez cambiabile en los suelos cultivados posiblemente se deba a la disminución de elementos básicos como: calcio, magnesio, potasio y sodio; y al aumento de iones ácidos como el H^+ . Como lo mencionan Carbonera (1984) y Encina (2017), los iones H^+ y ion Al^{3+} que se encuentran adsorbidos en los coloides del suelo representan a la acidez cambiabile, por lo que regulan la acidez. Así mismo, Mendes et al. (2013) mencionan que el pH y aluminio son los que regulan el grado de acidez del suelo. Entonces como el pH aumenta, la acidez cambiabile disminuirá, y como hemos visto los valores de pH anteriormente, se espera que la acidez cambiabile en los suelos vírgenes sea menor que en los suelos cultivados. En otra investigación Da Costa (2016) determinó que las concentraciones de H^+ en suelos vírgenes fue 2,5, mientras que los valores para suelos cultivados fueron

desde 1,2 hasta 2,8.

4.2. Análisis multivariado de correlaciones

Se realizó el análisis multivariado en función de las 16 propiedades químicas (Tabla 6). Se obtuvo que un total de 42 coeficientes (37 % del total) fue superior al 0,7, lo que es indicativo de una buena correlación entre las propiedades químicas utilizadas en la investigación (Tabla 2).

Tabla 2

Matriz de correlación de las propiedades químicas de los suelos vírgenes

Propiedades químicas	pH	pH*	Al	Cal	C.E.	M.O.	N	P	K	C.C.C.	Ca	Mg	K*	Na	S.B.	Acidez C.
	Suelos vírgenes															
pH actual	1,00															
pH potencial	0,99	1,00														
Aluminio cambiabile	-0,62	-0,62	1,00													
Calcáreo total	0,85	0,85	-0,21	1,00												
Conductividad eléctrica	0,17	0,17	-0,17	0,04	1,00											
Materia orgánica	-0,46	-0,46	0,02	-0,52	-0,28	1,00										
Nitrógeno total	-0,49	-0,50	0,03	-0,52	-0,22	0,92	1,00									
Fósforo disponible	0,99	0,99	-0,51	0,91	0,14	-0,49	-0,53	1,00								
Potasio disponible	0,87	0,86	-0,66	0,61	0,23	-0,15	-0,17	0,82	1,00							
C.C.C	-0,22	-0,23	0,07	-0,25	-0,02	0,55	0,60	-0,24	0,23	1,00						
Calcio cambiabile	0,88	0,88	-0,66	0,64	0,24	-0,17	-0,20	0,84	0,99	0,21	1,00					
Magnesio cambiabile	0,88	0,88	-0,66	0,64	0,24	-0,17	-0,20	0,84	0,99	0,21	0,99	1,00				
Potasio cambiabile	0,88	0,88	-0,66	0,64	0,24	-0,17	-0,20	0,84	0,99	0,21	0,99	0,99	1,00			
Sodio cambiabile	0,18	0,17	-0,02	0,24	-0,02	-0,20	-0,17	0,20	0,04	-0,13	0,04	0,04	0,04	1,00		
Saturación de bases	0,98	0,98	-0,68	0,75	0,25	-0,42	-0,48	0,95	0,89	-0,22	0,90	0,90	0,90	0,10	1,00	
Acidez cambiabile	-0,98	-0,98	0,68	-0,75	-0,24	0,43	0,48	-0,95	-0,87	0,27	-0,89	-0,89	-0,89	-0,10	-0,99	1,00

Nota: pH* = pH potencial, Al = aluminio, Cal = Calcáreo total, M.O. = Materia orgánica, N = Nitrógeno total, P = fósforo disponible, Potasio disponible, y C.C.C = capacidad de cambio catiónico, Ca = calcio cambiabile, Mg = magnesio cambiabile, K* = potasio cambiabile, Na = sodio cambiabile y S.B. = saturación de bases.

Se puede observar que, para los suelos vírgenes existe una correlación fuerte y positiva entre: pH y fósforo disponible ($r = 0,99$); calcio y magnesio - potasio cambiables ($r = 0,99$); fósforo disponible y saturación de bases ($r = 0,95$); fósforo disponible y calcáreo total ($r = 0,91$); materia orgánica y nitrógeno total ($r = 0,92$); fósforo disponible y calcio-magnesio-potasio cambiante ($r = 0,84$).

Una correlación fuerte y negativa entre: acidez cambiante y pH ($r = - 0,98$); acidez cambiante y fósforo disponible ($r = - 0,95$); acidez cambiante y calcio-magnesio-potasio cambiante ($r = - 0,89$); acidez cambiante y potasio disponible ($r = - 0,87$) y acidez cambiante y calcáreo total ($r = - 0,75$).

Las correlaciones positivas entre el pH con la saturación de bases, y el pH con el fósforo disponible son esperadas, ya que en tanto mayor sea el pH en el suelo, mayor será el contenido de saturación de bases y fósforo disponible, hasta ciertos límites; así mismo, en cuanto mayor sea el contenido de calcáreo total, mayor será el de fósforo disponible; del mismo modo cuando las concentraciones de fósforo disponible aumenten en el suelo, aumentarán las concentraciones de las bases: potasio, calcio y magnesio cambiables; también el potasio disponible. La misma tendencia se tendrá entre la materia orgánica y el nitrógeno total del suelo.

En tanto a las correlaciones negativas entre la acidez cambiante con el pH y el fósforo disponible indican que cuanto mayor sea la acidez cambiante del suelo entonces disminuirán el nivel del pH y el contenido de fósforo disponible, la misma tendencia tendrá con las concentraciones de calcáreo total, potasio disponible, potasio cambiante, saturación de bases, calcio y magnesio.

En resumen, en los suelos vírgenes se puede optar por analizar el pH, las bases cambiabales, el fósforo disponible, el potasio disponible y el nitrógeno total; ya que al variar cualquiera de estos, implicaría también un aumento o disminución en las propiedades con las cuales están altamente correlacionadas.

Tabla 3

Matriz de correlación de las propiedades químicas de los suelos cultivados

Propiedades Químicas	pH	pH*	AL	CAL	C.E.	M.O.	N	P	K	C.C.C.	Ca	Mg	K*	Na	S.B.	Acidez cambiabile
	Suelos cultivados															
pH actual	1,00															
pH potencial	0,99	1,00														
Aluminio cambiabile	-0,45	-0,45	1,00													
Calcáreo total	0,88	0,88	-0,15	1,00												
Conductividad eléctrica	0,13	0,12	-0,17	-0,05	1,00											
Materia orgánica	-0,27	-0,27	-0,24	-0,34	-0,08	1,00										
Nitrógeno total	-0,27	-0,27	-0,25	-0,36	-0,03	0,96	1,00									
Fósforo disponible	0,99	0,99	-0,37	0,92	0,09	-0,30	-0,31	1,00								
Potasio disponible	0,80	0,80	-0,50	0,65	0,19	0,16	0,12	0,78	1,00							
C.C.C	0,11	0,11	-0,43	0,02	0,10	0,61	0,54	0,07	0,64	1,00						
Calcio cambiabile	0,80	0,80	-0,49	0,65	0,19	0,15	0,11	0,78	0,99	0,63	1,00					
Magnesio cambiabile	0,81	0,81	-0,49	0,66	0,18	0,15	0,11	0,79	0,99	0,64	0,99	1,00				
Potasio cambiabile	0,81	0,81	-0,49	0,66	0,19	0,15	0,11	0,79	0,99	0,64	0,99	0,99	1,00			
Sodio cambiabile	0,17	0,17	-0,02	0,25	-0,10	-0,18	-0,20	0,20	0,03	-0,05	0,03	0,03	0,04	1,00		
Saturación de bases	0,98	0,97	-0,47	0,80	0,18	-0,23	-0,22	0,96	0,82	0,11	0,83	0,82	0,82	0,09	1,00	
Acidez cambiabile	-0,95	-0,94	0,24	-0,84	-0,14	0,37	0,36	-0,95	-0,70	0,10	-0,71	-0,71	-0,71	-0,09	-0,95	1,00

Nota: pH*= pH potencial, Al = aluminio, Cal = Calcáreo total, M.O. = Materia orgánica, N = Nitrógeno total, P = fósforo disponible, Potasio disponible, y C.C.C = capacidad de cambio catiónico, Ca = calcio cambiabile, Mg =magnesio cambiabile, K* = potasio cambiabile, Na = sodio cambiabile y S.B. = saturación de bases.

Se puede observar que para los suelos cultivados existe una correlación fuerte y positiva entre: pH y fósforo disponible ($r = 0,99$); potasio disponible y calcio-magnesio-potasio cambiables ($r = 0,99$); pH y saturación de bases ($r = 0,98$); materia orgánica y nitrógeno total ($r = 0,96$); fósforo disponible y saturación de bases ($r = 0,96$); calcáreo total y fósforo disponible ($r = 0,92$); pH y calcáreo total ($r = 0,88$); fósforo y calcio – potasio disponible ($r = 0,78$).

Una correlación fuerte y negativa entre: acidez cambiante y pH ($r = - 0,95$); acidez cambiante y fósforo disponible ($r = - 0,95$); acidez cambiante y saturación de bases ($r = - 0,95$); acidez cambiante y calcáreo total ($r = - 0,89$); acidez cambiante y potasio cambiante ($r = - 0,71$); y acidez cambiante y potasio disponible ($r = - 0,70$).

Su explicación es la misma que para los suelos vírgenes; siendo las correlaciones positivas entre el pH con la saturación de bases, y el pH con el fósforo disponible son esperadas, ya que en tanto mayor sea el pH en el suelo mayor será el contenido de saturación de bases y fósforo disponible hasta ciertos límites; así mismo en cuanto mayor sea el contenido de calcáreo total mayor será el de fósforo disponible; del mismo modo cuando las concentraciones de fósforo disponible aumenten en el suelo, aumentarán las concentraciones de las bases potasio, calcio y magnesio cambiables; también el contenido de potasio disponible. La misma tendencia se tendrá entre la materia orgánica y el nitrógeno total del suelo.

En tanto a las correlaciones negativas entre la acidez cambiante con el pH y el fósforo disponible, indican que, cuanto mayor sea la acidez cambiante del suelo entonces disminuirán el nivel del pH y el contenido de fósforo disponible, la misma tendencia tendrá con las concentraciones de calcáreo total, potasio disponible, potasio

cambiable, saturación de bases, calcio y magnesio.

Del mismo modo que en los suelos vírgenes se puede optar por analizar el pH, las bases cambiables, el fósforo disponible, el potasio disponible y el nitrógeno total; ya que al variar cualquiera de estos, nos indicarían también un aumento o disminución en las propiedades con las que están altamente correlacionadas.

En su investigación Mendes et al. (2013) mediante un análisis de correlaciones, determinaron que, el magnesio y potasio en los suelos cultivados son determinantes en la calidad del suelo, teniendo una correlación fuerte y positiva con la capacidad de cambio catiónico y el calcio, por lo tanto, al aumentar uno de ellos provocará el aumento del magnesio y viceversa.

En otras investigaciones en donde además incluyen a propiedades físicas, como en la investigación de Campitelli et al. (2010), comparando suelos cultivados y un suelo virgen, determinaron que propiedades relacionadas a la materia orgánica (carbono orgánico, ácidos fúlvicos, ácidos húmicos y nitrógeno total) resultaron correlacionadas negativamente con el pH y la densidad aparente del suelo. Mientras que, Navarro et al. (2008) en su análisis de correlaciones con 14 propiedades entre físicas y químicas, determinaron una alta correlación entre la materia orgánica y las propiedades físicas de porosidad total, conductividad hidráulica e infiltración acumulada. También una alta correlación entre la conductividad eléctrica y el porcentaje de arcilla en el suelo. Por su parte, Barrezueta (2017) en su análisis de correlaciones a 16 propiedades químicas y 3 propiedades físicas, determinó que, el pH, saturación de bases, capacidad de intercambio catiónico, calcio y potasio están altamente correlacionadas ($\geq 0,840$); el carbono y nitrógeno están correlacionadas con la capacidad de intercambio catiónico,

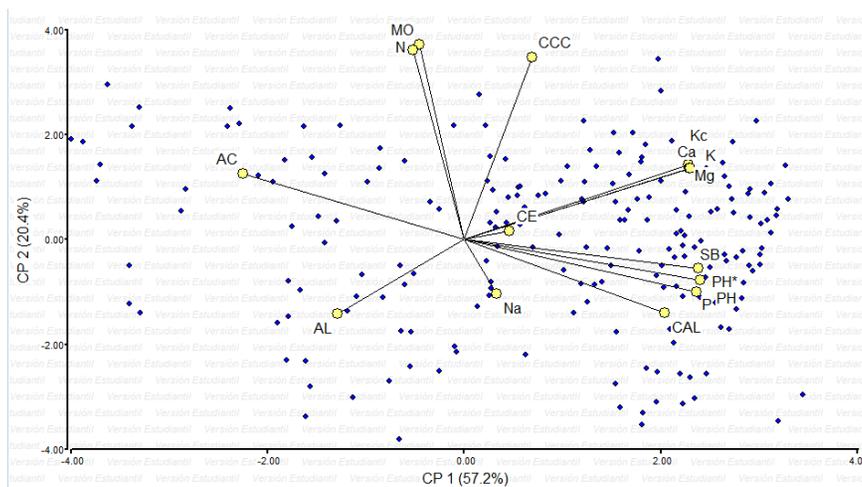
calcio y saturación de bases ($\geq 0,6$).

4.3. Análisis de componentes principales (ACP)

Con el objetivo de evaluar los indicadores químicos de calidad de los suelos de Huarango, se realizó el ACP en función de las 16 propiedades químicas.

Figura 18

Análisis de componentes principales



Podemos observar (Figura 18) que el primer componente principal explica el 57,2 % de la varianza, y se encuentran la mayor cantidad de muestras de los suelos; y como indicadores del primer componente, a las bases cambiables, pH, saturación de bases, fósforo y potasio disponible. Mientras que, el segundo componente principal explica el 20,4 % de la varianza y está representado principalmente por la materia orgánica, nitrógeno total y capacidad de cambio catiónico.

Tabla 4

Resultados del ACP, componentes principales (CP), valores propios y autovectores (AV) de las propiedades químicas en los suelos vírgenes, suelos cultivados y ambos.

Propiedades Químicas	Suelos vírgenes		Suelos cultivados		Ambos suelos			
	1CP	2CP	1CP	2CP	1CP	A V	2CP	AV
pH actual	0,99	0,08	0,96	-0,21	0,97	0,32	-0,19	-0,10
pH potencial	0,99	0,09	0,96	-0,21	0,97	0,32	-0,19	-0,10
Aluminio cambiante	-0,65	0,30	-0,49	-0,39	-0,52	-0,17	-0,34	-0,19
Calcáreo total	0,80	0,28	0,83	-0,35	0,83	0,27	-0,34	-0,19
Conductividad eléctrica	0,25	0,06	0,17	0,07	0,19	0,06	0,04	0,02
Materia orgánica	-0,44	-0,79	-0,11	0,91	-0,18	-0,06	0,90	0,50
Nitrógeno total	-0,47	-0,79	-0,13	0,89	-0,21	-0,07	0,87	0,48
Fósforo disponible	0,97	0,15	0,95	-0,26	0,96	0,32	-0,24	-0,13
Potasio disponible	0,92	-0,37	0,93	0,33	0,92	0,31	0,34	0,19
Capacidad de cambio catiónico	-0,13	-0,82	0,34	0,83	0,28	0,09	0,84	0,47
Calcio cambiante	0,93	-0,34	0,93	0,32	0,93	0,31	0,33	0,18
Magnesio cambiante	0,93	-0,34	0,93	0,31	0,93	0,31	0,33	0,18
Potasio cambiante	0,93	-0,34	0,93	0,31	0,93	0,31	0,33	0,18
Sodio cambiante	0,15	0,28	0,13	-0,25	0,13	0,04	-0,25	-0,14
Saturación de bases	0,99	0,03	0,96	-0,16	0,96	0,32	-0,13	-0,07
Acidez cambiante	-0,98	-0,05	-0,89	0,36	-0,91	-0,30	0,30	0,17
Valor propio	9,83	2,70	9,03	3,38	9,15	-	3,26	-
Varianza acumulada	61,49	78,40	56,65	77,77	57,21	-	77,60	-

NOTA. Elaboración propia

Se puede observar en el ACP (Tabla 4), a los indicadores químicos que aportaron más a la variación; se considera aquellos que presentan un alto coeficiente de correlación, o sea; siendo considerados significativos los coeficientes superiores a 0,70 y que explican cerca del 80 % de la varianza total. Los resultados arrojaron para los suelos vírgenes, en su primera componente principal, a los indicadores relacionados con la acidez del suelo, las bases cambiantes, y a su fertilidad. Se describe a continuación: pH actual (0,99), pH potencial (0,99), calcáreo total (0,80), fósforo

disponible (0,97), potasio disponible (0,92), calcio cambiante (0,93), magnesio cambiante (0,93), potasio cambiante (0,93), saturación de bases (0,99) y acidez cambiante (- 0,98); y para la segunda componente principal 3 indicadores relacionados con la fertilidad del suelo como son: materia orgánica (- 0,79), nitrógeno total (- 0,79) y capacidad de cambio catiónico (- 0,82).

Así mismo para los suelos cultivados en su primera componente principal se tiene a los siguientes indicadores relacionados con la acidez de suelo, las bases cambiantes, y a su fertilidad como se describe a continuación: pH actual (0,96), pH potencial (0,96), calcáreo total (0,83), fósforo disponible (0,95), potasio disponible (0,93), calcio cambiante (0,93), magnesio cambiante (0,93), potasio cambiante (0,93), saturación de bases (0,96) y acidez cambiante (- 0,89); y para la segunda componente principal a los indicadores relacionados con la fertilidad del suelo como son: materia orgánica (0,91), nitrógeno total (0,89) y capacidad de cambio catiónico (0,83). Siendo considerados significativos los coeficientes superiores a 0,70 y que explican cerca del 80 % de la varianza total.

También podemos observar en la (Tabla 4) la determinación de los componentes principales a ambos suelos (vírgenes y cultivados), se determinó dos componentes principales, y las propiedades químicas con sus respectivos autovectores, cuyos valores altos ayudan a determinar a las propiedades químicas que tienen mayor preponderancia.

En resumen, se determinó las propiedades que influyen más en ambos tipos de suelos, llámase a estos indicadores, los cuales están relacionados con la acidez del suelo, las bases cambiantes, y su fertilidad, por lo que se cree conveniente elegir como

indicadores de calidad de suelos de Huarango a las siguientes propiedades químicas: pH, saturación de bases, fósforo disponible, potasio disponible, nitrógeno total y capacidad de cambio catiónico.

En investigaciones usando propiedades similares; Mendes et al. (2013) usando un análisis multivariado, determinaron que los indicadores de calidad en los suelos vírgenes fueron: pH, aluminio y saturación de bases; fueron los de mayor representatividad en la calidad de esos suelos; seguido por los indicadores: sodio, porcentaje de sodio cambiante, fósforo, potasio, calcio y capacidad de cambio catiónico. Y para los suelos cultivados determinó como indicadores de calidad a las siguientes propiedades: fósforo, potasio, calcio, magnesio y capacidad de cambio catiónico; fueron los de mayor representatividad en la calidad de esos suelos; seguido por los indicadores: pH y aluminio, sodio y el porcentaje de sodio cambiante. Así mismo, Da Costa (2016) en su investigación usando el análisis de componentes principales en 10 propiedades químicas; determinó como indicadores de calidad a las siguientes propiedades: pH actual, pH potencial y acidez cambiante; seguido en orden de importancia las siguientes propiedades: bases cambiantes, calcio y magnesio.

En otra investigación Castillo et al. (2021) mediante el uso del análisis de componentes principales, evaluaron 10 propiedades químicas; sus resultados arrojaron como indicadores a las siguientes propiedades: pH, materia orgánica, fósforo y hierro; por su preponderancia para determinar la calidad del suelo; y a la conductividad eléctrica también representativa para la calidad del suelo, pero en menor grado.

En otras investigaciones usando propiedades químicas y físicas; Campitelli et al. (2010) comparando un suelo virgen y varios suelos cultivados, mediante un análisis de

componentes principales, determinaron como indicadores a las propiedades siguientes: carbono orgánico, ácidos fúlvicos, húmicos y nitrógeno total; fueron las más representativas para determinar la calidad del suelo; y fueron de mayor importancia que las propiedades físicas. Así mismo, Barrezueta (2017) usó un análisis de componentes principales para evaluar 16 propiedades químicas y 3 físicas; y determinó como indicadores de calidad a las siguientes propiedades: pH, bases cambiables, capacidad de intercambio catiónico, calcio y potasio; siendo los que mayor representatividad tienen en la calidad de esos suelos; seguido por las siguientes propiedades: carbono, nitrógeno, cobre, porcentaje de arena y magnesio, las cuales tuvieron menor representatividad en la calidad de los suelos.

4.4. Análisis de la calidad del suelo

En la determinación de los indicadores químicos se seleccionaron a 6 propiedades químicas: pH, saturación de bases, fósforo y potasio disponibles, nitrógeno total y capacidad de cambio catiónico; con el fin de ampliar la información se utilizó los 11 indicadores químicos comprendidos tanto en la primera como en la segunda componente principal, determinados en el ACP.

Tabla 5*Indicadores y sus valores medios, máximos y mínimos.*

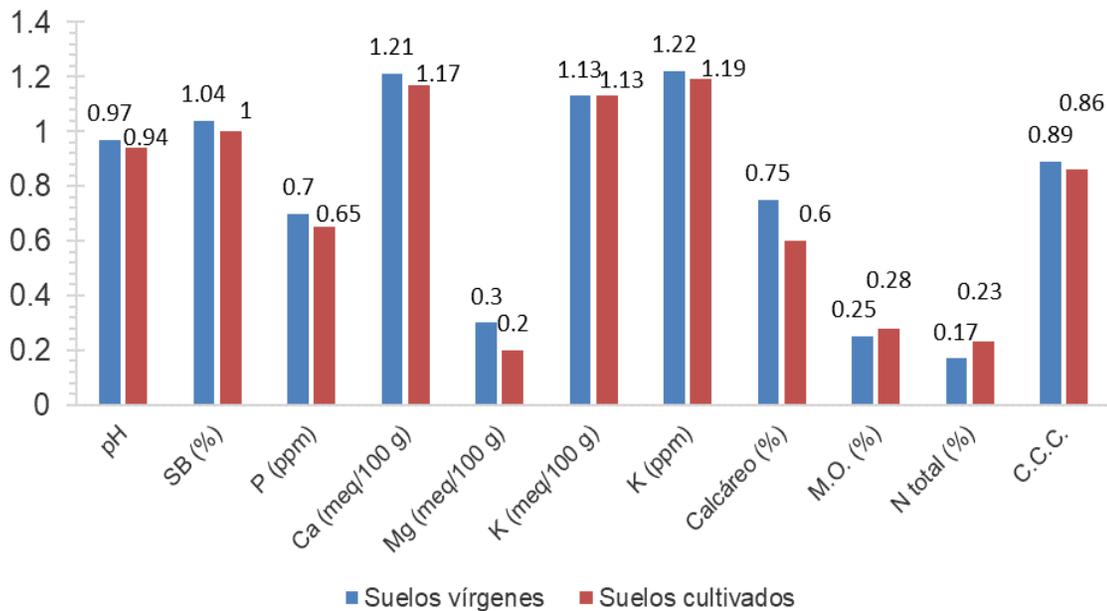
Indicador	Valores medios		Valor máximo (I MAX)	Valor mínimo (I MIN)
	Suelos vírgenes	Suelos cultivados		
pH actual	7,7	7,6	7,8	4,5
Saturación de bases (%)	91,7	90,1	90	50
Fósforo disponible (ppm)	16,1	15,4	20	7
Calcio cambiable (meq/100 g)	23	22,4	20	6
Magnesio cambiable (meq/100 g)	2,3	2,2	3	2
Potasio cambiable (meq/100 g)	1,1	1,1	1	0,2
Potasio disponible (ppm)	339,1	334	300	125
Calcáreo total (%)	4	3,4	5	1
Materia orgánica (%)	3	3,1	6	2
Nitrógeno total (%)	0,2	0,22	0,45	0,15
Capacidad de cambio catiónico (meq/100 g)	28,9	28,6	30	20

NOTA. Elaboración propia.

En la (Tabla 5) se muestra los valores medios de cada indicador de calidad, los cuales ya han sido determinados con antelación, puede revisar la (Tabla 1), mientras que los valores máximo (MAX) y mínimo (MIN); fueron obtenidos de las fichas técnicas de MIDAGRI – Perú (Información de uso público), teniendo en cuenta los requerimientos mínimo y máximo en que pueden desarrollarse sin dificultad los cultivos que predominan en la zona como: maíz, sorgo forrajero y arroz (registrados en las tarjetas de recolección de datos usada en el estudio de suelos del proyecto San Antonio de Huarango; ver Anexo). Tanto para el cultivo de café y cacao que prosperan en pH neutro y ligeramente ácido no se los evalúa en el análisis de calidad del suelo.

Figura 19

Valores normalizados de los indicadores de calidad de suelos de Huarango



Los valores de los indicadores fueron normalizados a una escala de 0 a 1 (Figura 19), utilizando la fórmula 1 propuesta en la metodología, considerando 0 el valor de mínima calidad y 1 el valor de máxima calidad.

De los 11 indicadores de calidad evaluados: el 45,45 % representa a clases de suelos de calidad alta y moderada, mientras que el 27,3 % representa a suelos que poseen un exceso de su presencia en el suelo; y el porcentaje restante representa a clase de suelos de baja calidad.

Los resultados para el indicador pH presentan valores cercanos a 1 tanto en los suelos vírgenes (0,97) como en los suelos cultivados (0,94), lo que parece no presentar un problema en el estado actual de la fertilidad del suelo, ya que se consideran valores óptimos para el desarrollo de los cultivos potenciales de la zona como el maíz.

Además, en los resultados se determinó valores en exceso de calcio, potasio cambiante y disponible en los suelos vírgenes (1,21; 1,13 y 1,12) y cultivados (1,17; 1,13 y 1,19).

FAO (2020) indica que las concentraciones elevadas de calcio y potasio en el suelo, presentan un problema, ya que sus cantidades excesivas puede limitar la disponibilidad de fósforo en el suelo; además, la disponibilidad potencial de calcio también está limitada por las formaciones de carbonatos de calcio. Esto es lo que podría ocasionar en los suelos en estudio; ya que, tuvieron un pH tendiendo a la alcalinidad cuyos valores de pH tanto en los suelos vírgenes fue (7,7) y en los suelos cultivados fue (7,6); sin embargo, se puede tomar medidas correctivas a través de enmiendas para no tener problemas de asimilación de los microelementos por los cultivos que se instalen.

Estrada et al. (2017) usaron el indicador pH y consideran al valor obtenido como óptimo para el desarrollo de los cultivos de maíz; para el indicador saturación de bases, presentó valores altos en los suelos vírgenes (1,04), así como en suelos cultivados (1,00).

Los resultados para el indicador fósforo disponible presentó lo siguientes valores: en suelos vírgenes (0,7), lo que indica un suelo de calidad alta y en los suelos cultivados (0,65), indica un suelo de calidad media, como la geología de la zona está representada por cerca del 70 % de origen calcáreo es posible que se este elemento tenga problemas de solubilidad.

Los resultados para el indicador magnesio cambiante presentaron valores en los suelos vírgenes (0,3) y en suelos cultivados (0,2), lo que indica que los suelos son de

baja calidad en este indicador, además su relación con el calcio es aproximadamente 10 veces más lo que ocasiona una deficiencia de magnesio y repercute en la fertilidad del suelo.

Para el potasio intercambiable se obtuvo un valor de (1,13) para ambos tipos de suelos, lo cual indica un suelo con contenido en exceso de este elemento, a pesar que la relación de este con el magnesio y calcio es aceptable.

Los valores de la capacidad de cambio catiónico fueron definidos principalmente por los contenidos de calcio, magnesio y potasio cambiables, los cuales fueron altos tanto para los suelos vírgenes y cultivados con valores de (0,89) y (0,86) respectivamente, lo que indican al suelo como de calidad alta. Estrada et al. (2017) consideran que esta condición es ideal para mantener una buena fertilidad del suelo, además, determinaron valores altos (0,96) en la capacidad de intercambio catiónico definidos principalmente por los contenidos de calcio y magnesio.

Para el indicador potasio disponible se obtuvo los valores de (1,22) y (1,19) tanto para los suelos vírgenes y cultivados respectivamente; superiores al valor ideal.

Los valores obtenidos para la materia orgánica para los suelos vírgenes (0,25) y suelos cultivados (0,28), indican un suelo de baja calidad; podría deberse a que la adición de material orgánico es inadecuado o su descomposición es lenta debido al elevado pH, además este valor está correlacionado con los valores bajos obtenidos de nitrógeno total en los suelos vírgenes (0,17) y los suelos cultivados (0,23), por lo que repercuten en el desarrollo de los cultivos; pero puede ser corregido a través de estiércoles compostados disponibles en la zona y residuos de cosecha.

Da Costa (2016) menciona que la materia orgánica se ha destacado por ser un

componente clave de la calidad de suelo, ya que está estrechamente asociada a la mayoría de las propiedades del suelo, además de ser muy sensible a los cambios de prácticas de manejo.

El indicador calcáreo total con valores en los suelos vírgenes (0,75) y los suelos cultivados (0,60) no representan a un suelo de alta calidad, por el contrario, según FAO (2020) su contenido alto puede formar complejos insolubles con otros elementos llegando a ser acumulados y no disponibles para las plantas.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- No hubo ninguna diferencia significativa entre los valores medios de las propiedades químicas de los suelos vírgenes y cultivados de acuerdo al análisis de varianza realizado. Además, los valores medios del pH (7,6), calcáreo total (3,9 %), fósforo (16,1 ppm), potasio (339,1 ppm), capacidad de cambio catiónico (28,9 meq/100 g), calcio (22,9 meq/100 g), magnesio (2,3 meq/100 g), sodio (0,12 meq/100 g) y saturación de bases (91,7 %), fueron superiores en los suelos vírgenes.
- Existe alta correlación entre el pH y 9 propiedades químicas; entre la materia orgánica y el nitrógeno total; entre el fósforo y las bases cambiables; entre la saturación de bases y, el fósforo y potasio disponibles.
- Las propiedades químicas que influyen más o son determinantes en la calidad de los suelos de Huarango son: pH, saturación de bases, fósforo disponible, nitrógeno total, potasio disponible y capacidad de cambio catiónico.

5.2 Recomendaciones

- Los indicadores de calidad determinados en esta investigación son relativos y representan una visión en tiempo y espacio, por lo que deben ser validados a lo largo del tiempo para registrar sus cambios.
- Los indicadores de calidad determinados, podrían servir para el monitoreo

constante de los suelos de Huarango y proponer prácticas adecuadas de manejo, por lo que se debe continuar con la investigación.

CAPÍTULO VI

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Astier-Calderón, M., Maass-Moreno, M., & Etchevers-Barra, J. (2002). Derivación de indicadores de calidad de suelos en el contexto de la agricultura sustentable. *Agrociencia*, 36(5), 605 – 620.
- Bazán Tapia, R. (2017). *Manual de procedimientos de los análisis de suelos y agua con fines de riego*. Ministerio de Agricultura y Riego. Ed. Instituto Nacional de Innovación Agraria – INIA. Lima, Perú. 89 p.
- Bran, D. E., Gaitán, J. J., & Wilson, M. G. (2017). *Los indicadores de calidad de suelo como un componente de la sustentabilidad de los agro ecosistemas: manual de indicadores de calidad del suelo para las ecorregiones de Argentina*. Wilson, MG (ed.). Editorial INTA. p.15 -17.
- Bautista Cruz, A., Etchevers Barra, J., Del Castillo, R. F., & Gutiérrez, C. (2004). La calidad del suelo y sus indicadores. *Ecosistemas*, 13(2), 90 – 97.
- Barrezueta – Unda, S., Paz Gonzáles, A., & Chabla – Carrillo, J. (2017). Determinación de indicadores para calidad de suelos cultivados con cacao en provincia El Oro – Ecuador. *Revista Cumbres*, 3(1), 17 – 24.
- Camacho – Tamayo, J. H., Luengas – Gómez, C., & Leiva, F. 2010. Análisis multivariado de propiedades químicas en Oxisoles con diferentes niveles de intervención agrícola. *Acta Agronómica*, 59 (3), 273 – 284.
- Bech Vertti, J. (2019). *Análisis multivariado*. Universidad Autónoma de Aguas Calientes. Primera Edición. p. 24 – 27.
- Campitelli, P., Aoki, A., Gudel, O., Rubenacker, A., & 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. *Suelo (Argentina)*, 28(2), 223 – 231.
- Cantú, M. P., Becker, A., Bedano, J. C., & Schiviano, F. (2007). Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices en la Pampa Argentina. *Ciencia Suelo*, 25, 173-178.
- Casalinho, H. D., Martins, S. R., Da Silva, J. B. & Lopes, A. D. (2007). Calidad del suelo como indicador de sostenibilidad de agro ecosistemas (Portugués). *Revista Brasileira Agrociência*, Pelotas, 13(2), 195-203.
- Castillo – Valdez, X., Etchevers, J. D., Hidalgo – Moreno, C. M. I., & Aguirre – Gómez, A. (2021). Evaluación de la calidad de suelo: generación e interpretación de indicadores. *Terra Latinoamericana*, 39, e698.
- Cerón Rincón, L. E., & Melgarejo Muñoz, L. M. (2005). Enzimas del suelo: indicadores de salud y calidad. *Acta Biológica Colombiana*, 10(1), 5 -18.
- Crisci, J. V., & López, M. F. (1983). *Introducción a la teoría y práctica de la taxonomía numérica*. Serie de biología Monografía N°26. Secretaría General de la O.E.A. Programa regional de desarrollo científico y tecnológico. Washington, D.C. 132 p.
- Colás Sánchez, A., Cairo Cairo, P., Machado de Armas, J., Ruiz González, J., Torres Artilles, P., & Dávila Cruz, A. (2008). Análisis multivariado de las propiedades de un suelo ferralítico rojo (oxisol), como base para la selección de indicadores de calidad. *Centro Agrícola*, 35(3), 17 -23.
- Da Costa, J.A. (2016). *Indicadores de calidad del suelo en diferentes modelos de*

- agricultura familiar en el semiárido Pernambuco (portugués)*. Mestre. Pernambuco, Brasil, Universidade Federal Rural de Pernambuco. 68p.
- Encina Oliva, K.M. (2017). *Escoria básica y carbonato de calcio en la recuperación de un suelo ácido de Tingo María, en maíz (Zea mays) PM 213 en invernadero*. Ingeniero. Lima, Perú, Universidad Nacional Agraria La Molina. 56 p.
- Estrada-Herrera, R. I., Hidalgo-Moreno, C., Guzmán-Plazola, R., Almaraz Suárez, J. J., Navarro-Garza, H., & Etchevers-Barra, J. D. (2017). Indicadores de calidad de suelo para evaluar su fertilidad. *Agrociencia*, 51(8), 813-831.
- Febles, G., Torres, V., Baños, R., Ruiz, T. E., Yañez, S., & Echeverría, J. (2011). Aplicación del análisis multivariado para determinar la preponderancia de factores edafoclimáticos en la producción de semillas de gramíneas pratenses tropicales. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 45(1), 45 – 52.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Italia); ISRIC (Centro Internacional de Referencia e Información en Suelos); Sociedad Internacional de las ciencias del suelo.1999. *Base referencial mundial de recurso suelo*. Informe 106. Roma, Italia. p. 71.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Italia). (2015). *Agricultura familiar en América Latina y el Caribe: objetivos de desarrollo sostenible: tierra y suelos*. Consultado 15 abr. 2020. Disponible en: <http://www.fao.org/sustainable-development-goals/overview/fao-and-post-2015/land-and-soils/es/>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura).

- (2020). *Portal de suelos de la FAO: propiedades químicas*. Consultado 30 ago. 2020. Disponible en: <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/clasificacion-de-suelos/sistemas-numericos/propiedades-quimicas/es/>
- Franco, T. L., & Hidalgo, R. (2003). *Análisis Estadístico de Datos de Caracterización Morfológica de Recursos Fitogenéticos*. Boletín técnico no.8, Instituto Internacional de Recursos Fitogenéticos (IPGRI), Cali, Colombia. 89 p.
- Garbisu C., Becerril J. M., Epelde L., & Alkorta I. (2007). Bioindicadores de la calidad del suelo: herramienta metodológica para la evaluación de la eficacia de un proceso fitorremediador. *Ecosistemas*, 16(2), 1 – 6.
- García, Y., Ramírez, W., & Sánchez, S. (2012). Indicadores de la calidad de los suelos: una manera de evaluar este recurso. *Pastos y Forrajes*, 35(2), 125-138.
- Gómez Ávila, A. B., & Hoyos Rojas, W. Y. (2020). *Evaluación de la calidad de un suelo sometido a diferentes usos*. Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales Programa de Ingeniería Agronómica. Villavicencio. (Tesis). 57 p.
- León González, A., Llinás Solano, H., & Tilano, J. (2011). Análisis multivariado aplicando componentes principales al caso de los desplazados. *Ingeniería y Desarrollo*, 23, 119 – 142.
- Mendes, A. M., De Melo, S. B., Olszaersk, N., Giongo, V., & Arcoverde, S. N. (2013). Selección de indicadores de calidad química para suelos en la

región alrededor del lago Sobradinho – BA (portugués). Ciencia Do Solo. XXXIV Congreso Brasileiro de Ciencia do solo. Costao do Santinho Resort. Florianópolis.

Meza Aliaga, M., Castro Correa, C. P., Pereira Acuña, K., & Puga Morales, G. (2017). Indicadores para el monitoreo de la calidad del suelo en áreas periurbanas. Valle de Quillota, cuenca del Aconcagua, Chile. *Interciencia*, 42(8), 494 – 502.

Navarro Bravo, A., Figueroa Sandoval, B., Martínez Menes, M., González Cossio, F., & Osuna Ceja, S. E. (2008). *Agricultura Técnica en México*, 34 (2), 151 – 158.

Oliva Escobar, D.P. (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. Tesis. 28 p.

Paula, B. V.; Lima A. C. R., Casalinho, H. D., Buss, R. B., Ribes, R., & Ribeiro T. R. (2015). Diagnóstico de la calidad del suelo bajo cultivo de durazno en agroecosistema familiar (portugués). *Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata*, 114(2), 27 – 278.

Portillo Rosero, A. M. (2015). “Análisis multivariado para la caracterización de zonas agroecológicas según factores edafoclimáticos en las fincas productoras de banano del Urabá Antioqueño”. Facultad de Ingeniería, Santiago de Cali, Colombia. (Título). 62 p.

Prieto-Méndez, J., Prieto-García, F., Acevedo-Sandoval, O.A., & Méndez - Marzo,

- M. A. (2013). Indicadores e índices de calidad de los suelos (ICS) cebaderos del sur del estado de Hidalgo, México. *Agronomía Mesoamericana*, 24(1), 83 – 91.
- Rendón Pareja, S., Artunduaga Lemus, F., Ramírez Pisco, R., Quiroz Gamboa, J. A., & Leiva Rojas, E. L. (2011). Los macroinvertebrados como indicadores de la calidad del suelo en cultivos de mora, pasto y aguacate. Facultad Nacional de Agronomía, *Medellín*, 64(1), 5793 – 5802.
- Soil Survey Staff. (2014). *Keys to Soil Taxonomy*, 12 ed. USDA Natural Resources Conservation Service, Washington, DC. p. 40 – 41.
- Solla-Gullón, F., Rodríguez-Soalleiro, R., & Merino, A. (2001). Evaluación del aporte de cenizas de madera como fertilizante de un suelo ácido mediante un ensayo en laboratorio. *Producción de protección vegetal*, 16(3), 379-393.
- Villareal-Núñez, J., Pla-Sentis, I., Agudo-Martínez, L., Villaláz-Pérez, J., Rosales, F., & Pocasangre, L. (2013). Índice de calidad del suelo en áreas cultivadas con banano en Panamá. *Agronomía Mesoamericana*, 24(2), 301 – 315.
- Villazón Gómez, J. A., Martín Gutierrez, J., & Cobo Vidal, J. (2017). “Análisis multivariado de las propiedades químicas de los suelos pardos erosionados”. *Centro Agrícola*, 44(1), 56 – 62.
- Wilson, M. G. (2017). Manual de indicadores de calidad del suelo para las ecorregiones de Argentina. Wilson, M.G. (ed.). Argentina, *Ediciones INTA*. 296 p.
- WRB, IUSS Working Group. (2006). *Base referencial mundial del recurso suelo 2014*, actualización 2015. Sistema internacional de clasificación de suelos

para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos: informe de 2014. Roma, Italia. P. 99 - 110.

WRB, IUSS Working Group. (2015). *Base referencial mundial del recurso suelo 2014*, actualización 2015. Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos: informe de 2014. Roma, Italia. P. 152 – 193.

ANEXOS

Tabla 6

Matriz básica de datos para la caracterización de 223 muestras de suelos del distrito de Huarango.

N°	PH	PH*	AL	CAL	C.E.	M.O.	N	P	K	C.C.C.	Ca	Mg	kc	Na	SB	AC
1	7.35	5.98	0.00	0.60	63.00	3.65	0.22	13.91	337.60	30.47	22.76	2.25	1.13	0.02	85.98	4.30
2	6.51	5.34	0.00	0.00	104.00	5.27	0.32	10.52	308.91	32.91	19.92	1.97	0.99	0.02	69.65	10.02
3	7.53	6.11	0.00	1.75	287.00	4.27	0.26	14.72	314.76	26.40	20.53	2.03	1.02	0.02	89.48	2.81
4	7.67	6.22	0.00	2.58	360.00	3.03	0.19	15.36	346.70	29.55	23.67	2.34	1.17	0.02	92.20	2.34
5	6.24	5.14	0.00	0.00	99.00	8.61	0.53	9.57	341.41	40.92	22.90	2.27	1.13	0.02	64.41	14.60
6	6.68	5.47	0.00	0.00	300.00	5.05	0.31	11.16	283.54	27.57	17.48	1.73	0.87	0.02	72.96	7.48
7	7.82	6.33	0.00	3.48	262.00	2.10	0.13	16.08	299.24	23.15	19.13	1.89	0.95	0.02	95.12	1.16
8	7.68	6.23	0.00	2.56	252.00	1.03	0.06	15.41	321.33	26.55	21.32	2.11	1.06	0.02	92.40	2.05
9	7.10	5.79	0.00	0.03	275.00	4.38	0.27	12.84	255.94	21.06	14.85	1.47	0.74	0.01	81.12	4.00
10	6.27	5.16	0.00	0.00	75.00	4.27	0.26	9.67	226.13	21.20	11.97	1.19	0.59	0.01	64.99	7.44
11	7.75	6.28	0.00	3.09	298.00	3.43	0.21	15.74	313.92	25.15	20.49	2.03	1.02	0.02	93.76	1.60
12	7.51	6.10	0.00	1.59	326.00	3.28	0.20	14.63	301.48	24.92	19.29	1.91	0.96	0.02	89.09	2.75
13	5.85	4.84	0.23	0.00	187.00	3.79	0.23	8.29	206.63	20.49	10.11	1.00	0.50	0.01	56.82	8.86
14	7.71	6.25	0.00	2.83	421.00	3.23	0.20	15.55	309.58	24.85	20.08	1.99	1.00	0.02	92.98	1.77
15	7.58	6.15	0.00	2.11	479.00	5.51	0.26	14.95	332.85	28.27	22.22	2.20	1.10	0.02	90.46	2.73
16	7.86	6.36	0.00	3.76	291.00	3.05	0.14	16.27	356.81	29.58	24.64	2.44	1.22	0.02	95.90	1.25
17	8.01	6.48	0.00	4.70	235.00	3.03	0.14	17.00	367.43	29.55	25.67	2.54	1.27	0.03	100.00	0.00
18	7.92	6.41	0.00	4.20	449.00	4.64	0.22	16.56	381.45	31.95	26.95	2.67	1.34	0.03	97.06	0.98
19	7.92	6.41	0.00	4.12	347.00	2.73	0.13	16.56	311.83	24.09	20.32	2.01	1.01	0.02	97.06	0.74
20	6.65	5.45	0.00	0.00	483.00	4.64	0.37	11.05	310.44	31.95	20.09	1.99	1.00	0.02	72.38	8.86
21	7.55	6.13	0.00	1.80	657.00	2.39	0.19	14.81	312.13	26.08	20.36	2.02	1.01	0.02	89.87	2.67
22	7.96	6.44	0.00	4.43	496.50	4.10	0.32	16.76	283.88	20.65	17.55	1.74	0.87	0.02	97.84	0.47
23	6.06	5.00	0.00	0.00	427.50	4.64	0.37	8.96	250.04	26.95	14.26	1.41	0.71	0.01	60.91	10.56
24	6.78	5.55	0.00	0.00	348.00	5.51	0.43	11.55	293.28	28.27	18.40	1.82	0.91	0.02	74.90	7.12
25	7.94	6.42	0.00	4.22	1236.00	1.86	0.15	16.66	344.67	27.79	23.53	2.33	1.17	0.02	97.45	0.74
26	7.77	6.30	0.00	3.18	1183.50	2.55	0.20	15.84	345.51	28.82	23.58	2.33	1.17	0.02	94.15	1.72
27	8.18	6.61	0.00	5.67	706.50	0.64	0.05	17.86	333.97	25.96	22.55	2.23	1.12	0.02	100.00	0.00
28	7.94	6.42	0.00	4.30	472.50	3.94	0.31	16.66	373.08	30.91	26.17	2.59	1.30	0.03	97.45	0.82
29	7.72	6.26	0.00	2.89	1077.00	3.07	0.24	15.60	349.86	29.61	23.97	2.37	1.19	0.02	93.18	2.05
30	8.11	6.55	0.00	5.32	718.50	3.07	0.24	17.51	368.04	29.61	25.73	2.55	1.28	0.03	100.00	0.00
31	8.13	6.57	0.00	5.43	750.00	2.55	0.20	17.61	360.69	28.82	25.04	2.48	1.24	0.03	100.00	0.00
32	7.82	6.33	0.00	3.54	769.50	3.85	0.30	16.08	365.37	30.77	25.43	2.52	1.26	0.03	95.12	1.54
33	8.00	6.29	0.00	3.16	730.50	3.46	0.27	15.79	356.98	30.19	24.64	2.44	1.22	0.02	93.95	1.86
34	7.63	6.19	0.00	2.34	691.50	3.38	0.27	15.18	349.13	30.07	23.89	2.36	1.18	0.02	91.43	2.61
35	7.62	6.18	0.00	2.22	1551.00	1.75	0.14	15.13	286.69	22.63	17.94	1.78	0.89	0.02	91.23	2.01
36	7.48	6.08	0.00	1.37	1696.50	2.55	0.20	14.49	291.05	23.82	18.32	1.81	0.91	0.02	88.51	2.76

37	7.16	5.83	0.00	0.06	460.50	2.62	0.21	13.09	278.52	23.93	17.11	1.69	0.85	0.02	82.29	4.26
38	8.00	6.13	0.00	1.79	1083.00	2.10	0.17	14.81	288.30	23.15	18.08	1.79	0.90	0.02	89.87	2.37
39	7.11	5.80	0.00	0.09	760.50	2.73	0.22	12.88	277.68	24.09	17.02	1.69	0.84	0.02	81.32	4.53
40	6.87	5.61	0.00	0.00	1204.50	3.31	0.26	11.90	273.83	24.96	16.62	1.65	0.82	0.02	76.65	5.85
41	6.01	4.96	0.00	0.00	1002.00	3.94	0.31	8.80	241.72	25.91	13.49	1.34	0.67	0.01	59.93	10.40
42	7.57	6.14	0.00	1.92	469.50	2.10	0.17	14.90	289.11	23.15	18.15	1.80	0.90	0.02	90.26	2.28
43	7.86	6.36	0.00	3.73	883.50	2.10	0.17	16.27	300.86	23.15	19.29	1.91	0.96	0.02	95.90	0.98
44	7.82	6.33	0.00	3.49	1173.00	2.55	0.20	16.08	305.23	23.82	19.69	1.95	0.98	0.02	95.12	1.19
45	7.59	6.16	0.00	2.06	1239.00	2.48	0.20	14.99	294.78	23.72	18.68	1.85	0.93	0.02	90.65	2.25
46	7.89	6.39	0.00	3.88	1281.00	1.20	0.09	16.41	289.89	21.80	18.27	1.81	0.91	0.02	96.48	0.79
47	7.65	6.21	0.00	2.39	1023.00	1.40	0.11	15.27	283.35	22.10	17.63	1.75	0.87	0.02	91.82	1.83
48	7.51	6.10	0.00	1.56	1429.50	2.63	0.21	14.63	293.31	23.94	18.53	1.83	0.92	0.02	89.09	2.64
49	8.32	6.71	0.00	6.63	402.00	3.07	0.24	18.59	323.04	24.61	21.38	2.12	1.06	0.02	100.00	0.00
50	7.98	6.45	0.00	4.51	753.00	3.10	0.24	16.86	319.42	24.65	21.03	2.08	1.04	0.02	98.23	0.47
51	7.77	6.30	0.00	3.21	1221.00	3.28	0.26	15.84	312.82	24.92	20.39	2.02	1.01	0.02	94.15	1.49
52	7.98	6.45	0.00	4.52	615.00	3.19	0.25	16.86	320.68	24.78	21.15	2.09	1.05	0.02	98.23	0.47
53	7.95	6.43	0.00	4.30	823.50	2.42	0.19	16.71	308.84	23.63	20.04	1.98	0.99	0.02	97.65	0.58
54	8.09	6.54	0.00	5.12	3006.00	1.10	0.07	17.41	340.41	26.65	23.15	2.29	1.15	0.02	100.00	0.00
55	8.19	6.61	0.00	5.84	804.00	3.37	0.23	17.91	372.17	30.06	26.11	2.59	1.29	0.03	100.00	0.00
56	7.90	6.39	0.00	3.98	1051.50	2.23	0.15	16.46	347.74	28.35	23.81	2.36	1.18	0.02	96.68	0.98
57	7.53	6.11	0.00	1.64	1630.50	1.43	0.10	14.72	319.33	27.15	21.10	2.09	1.05	0.02	89.48	2.88
58	8.36	6.74	0.00	6.91	721.50	3.72	0.25	18.80	377.07	30.58	26.57	2.63	1.32	0.03	100.00	0.00
59	8.16	6.59	0.00	5.56	2761.50	1.10	0.07	17.76	340.41	26.65	23.15	2.29	1.15	0.02	100.00	0.00
60	8.28	6.68	0.00	6.35	1033.50	2.23	0.15	18.38	356.28	28.35	24.63	2.44	1.22	0.02	100.00	0.00
61	8.45	6.81	0.00	7.45	694.50	3.56	0.24	19.27	374.83	30.34	26.36	2.61	1.31	0.03	100.00	0.00
62	7.96	6.44	0.00	4.40	1065.00	3.43	0.23	16.76	367.16	30.15	25.63	2.54	1.27	0.03	97.84	0.69
63	8.22	6.64	0.00	5.98	630.00	2.21	0.15	18.07	355.94	28.32	24.60	2.44	1.22	0.02	100.00	0.00
64	6.57	5.39	0.00	0.00	741.00	3.63	0.25	10.75	295.85	30.45	18.73	1.85	0.93	0.02	70.82	8.91
65	7.52	6.11	0.00	1.69	2172.00	4.26	0.29	14.67	354.36	31.39	24.35	2.41	1.21	0.02	89.29	3.40
66	8.06	6.52	0.00	5.01	598.50	2.99	0.24	17.25	272.32	18.98	16.49	1.63	0.82	0.02	100.00	0.00
67	7.12	5.80	0.00	0.08	729.00	3.46	0.24	12.92	323.20	30.19	21.38	2.12	1.06	0.02	81.51	5.61
68	4.94	4.15	2.60	0.00	168.00	0.86	0.07	5.84	156.04	15.79	5.37	0.53	0.27	0.01	39.13	9.62
69	6.31	5.19	0.00	0.00	459.00	2.25	0.15	9.81	269.07	28.38	16.21	1.61	0.80	0.02	65.77	9.74
70	4.70	3.97	3.48	0.00	130.50	3.14	0.21	5.31	193.71	29.71	8.90	0.88	0.44	0.01	34.47	19.48
71	6.67	5.46	0.00	0.00	328.50	3.75	0.26	11.12	302.41	30.63	19.36	1.92	0.96	0.02	72.76	8.37
72	4.50	3.82	4.31	0.00	70.50	0.40	0.03	4.91	141.75	15.10	4.01	0.40	0.20	0.00	30.58	10.49
73	8.14	6.58	0.00	5.56	297.00	4.27	0.29	17.66	384.76	31.41	27.28	2.70	1.35	0.03	100.00	0.00
74	8.49	6.84	0.00	7.71	225.00	3.49	0.24	19.49	373.85	30.24	26.27	2.60	1.30	0.03	100.00	0.00
75	8.34	6.73	0.00	6.75	726.00	2.76	0.19	18.69	363.64	29.14	25.32	2.51	1.25	0.03	100.00	0.00
76	7.25	5.90	0.00	0.08	627.00	2.13	0.14	13.48	314.32	28.20	20.59	2.04	1.02	0.02	84.04	4.53
77	8.02	6.49	0.00	4.78	661.50	3.47	0.24	17.05	373.57	30.21	26.24	2.60	1.30	0.03	100.00	0.00
78	6.84	5.59	0.00	0.00	2865.00	3.32	0.23	11.78	306.90	29.98	19.81	1.96	0.98	0.02	76.07	7.20

79	8.38	6.76	0.00	7.04	439.50	3.87	0.26	18.90	379.17	30.81	26.76	2.65	1.33	0.03	100.00	0.00
80	8.20	6.62	0.00	5.91	553.50	3.69	0.25	17.97	376.65	30.54	26.53	2.63	1.32	0.03	100.00	0.00
81	8.13	6.57	0.00	5.44	864.00	2.71	0.18	17.61	362.94	29.07	25.25	2.50	1.25	0.03	100.00	0.00
82	8.49	6.84	0.00	7.70	339.00	3.28	0.22	19.49	370.91	29.92	25.99	2.57	1.29	0.03	100.00	0.00
83	7.70	6.24	0.00	2.78	2122.50	3.31	0.23	15.51	351.88	29.97	24.16	2.39	1.20	0.02	92.79	2.20
84	8.40	6.77	0.00	7.13	459.00	2.95	0.20	19.01	366.30	29.43	25.56	2.53	1.27	0.03	100.00	0.00
85	7.94	6.42	0.00	4.28	1071.00	3.38	0.23	16.66	365.39	30.07	25.46	2.52	1.26	0.03	97.45	0.80
86	7.95	6.43	0.00	4.30	996.00	2.47	0.17	16.71	353.50	28.71	24.35	2.41	1.21	0.02	97.65	0.71
87	8.42	6.79	0.00	7.27	670.50	3.31	0.23	19.12	371.33	29.97	26.03	2.58	1.29	0.03	100.00	0.00
88	8.31	6.70	0.00	6.56	772.50	2.86	0.19	18.54	364.98	29.28	25.44	2.52	1.26	0.03	100.00	0.00
89	8.40	6.77	0.00	7.06	984.00	1.24	0.08	19.01	342.37	26.86	23.34	2.31	1.16	0.02	100.00	0.00
90	8.49	6.84	0.00	7.68	222.00	2.58	0.18	19.49	361.12	28.87	25.08	2.48	1.24	0.03	100.00	0.00
91	8.49	6.84	0.00	7.68	550.50	2.72	0.19	19.49	363.14	29.09	25.27	2.50	1.25	0.03	100.00	0.00
92	8.47	6.83	0.00	7.57	712.50	2.94	0.20	19.38	366.16	29.41	25.55	2.53	1.27	0.03	100.00	0.00
93	8.21	6.63	0.00	5.90	1164.00	1.73	0.12	18.02	349.23	27.60	23.97	2.37	1.19	0.02	100.00	0.00
94	7.81	6.33	0.00	3.46	1492.50	3.31	0.23	16.03	357.65	29.97	24.71	2.45	1.23	0.02	94.93	1.56
95	8.47	6.83	0.00	7.54	960.00	2.35	0.16	19.38	357.90	28.53	24.78	2.45	1.23	0.02	100.00	0.00
96	8.45	6.81	0.00	7.43	594.00	2.78	0.19	19.28	363.98	29.18	25.35	2.51	1.26	0.03	100.00	0.00
97	8.36	6.74	0.00	6.90	628.50	3.37	0.23	18.80	372.17	30.06	26.11	2.59	1.29	0.03	100.00	0.00
98	8.41	6.78	0.00	7.24	583.50	4.11	0.28	19.06	382.53	31.17	27.08	2.68	1.34	0.03	100.00	0.00
99	8.37	6.75	0.00	6.94	733.50	2.86	0.19	18.85	365.04	29.29	25.45	2.52	1.26	0.03	100.00	0.00
100	7.92	6.41	0.00	4.11	2070.00	2.23	0.15	16.56	348.73	28.35	23.90	2.37	1.18	0.02	97.06	0.87
101	6.27	5.16	0.00	0.00	826.50	4.48	0.30	9.67	287.74	31.72	17.91	1.77	0.89	0.02	64.99	11.13
102	8.04	6.50	0.00	4.88	1402.50	2.96	0.20	17.15	366.44	29.44	25.58	2.53	1.27	0.03	100.00	0.00
103	8.29	6.69	0.00	6.47	883.50	3.62	0.25	18.43	375.67	30.43	26.44	2.62	1.31	0.03	100.00	0.00
104	7.27	5.92	0.00	0.12	574.50	4.03	0.32	13.56	337.90	31.05	22.77	2.25	1.13	0.02	84.43	4.87
105	7.67	6.22	0.00	2.56	1428.00	2.67	0.18	15.36	342.03	29.01	23.24	2.30	1.15	0.02	92.20	2.29
106	8.45	6.81	0.00	7.40	712.50	1.96	0.13	19.28	352.44	27.94	24.27	2.40	1.20	0.02	100.00	0.00
107	8.49	6.84	0.00	7.66	528.00	2.23	0.15	19.49	356.22	28.35	24.63	2.44	1.22	0.02	100.00	0.00
108	8.49	6.84	0.00	7.65	712.50	1.96	0.13	19.49	352.44	27.94	24.27	2.40	1.20	0.02	100.00	0.00
109	8.49	6.84	0.00	7.63	537.00	1.36	0.09	19.49	344.05	27.04	23.49	2.33	1.16	0.02	100.00	0.00
110	8.11	6.55	0.00	5.33	1870.50	3.24	0.22	17.51	370.35	29.86	25.94	2.57	1.29	0.03	100.00	0.00
111	7.90	6.39	0.00	4.02	964.50	3.31	0.23	16.46	362.37	29.97	25.17	2.49	1.25	0.03	96.68	1.03
112	7.84	6.35	0.00	3.65	664.50	3.32	0.23	16.17	359.36	29.98	24.88	2.46	1.23	0.02	95.51	1.38
113	7.63	6.19	0.00	2.33	1663.50	3.13	0.21	15.18	345.90	29.70	23.59	2.34	1.17	0.02	91.43	2.58
114	8.46	6.82	0.00	7.50	1380.00	2.78	0.19	19.33	363.92	29.17	25.34	2.51	1.26	0.03	100.00	0.00
115	8.19	6.61	0.00	5.88	514.50	4.59	0.31	17.91	389.24	31.89	27.70	2.74	1.37	0.03	100.00	0.00
116	8.19	6.61	0.00	5.82	588.00	2.95	0.20	17.91	366.30	29.43	25.56	2.53	1.27	0.03	100.00	0.00
117	7.12	5.80	0.00	0.08	1099.50	3.75	0.26	12.92	326.53	30.63	21.69	2.15	1.08	0.02	81.51	5.69
118	8.45	6.81	0.00	7.36	430.50	0.93	0.06	19.28	338.03	26.40	22.93	2.27	1.14	0.02	100.00	0.00
119	8.38	6.76	0.00	6.98	570.00	2.26	0.15	18.90	356.64	28.39	24.67	2.44	1.22	0.02	100.00	0.00
120	8.06	6.52	0.00	4.99	657.00	2.53	0.17	17.25	360.42	28.80	25.02	2.48	1.24	0.03	100.00	0.00

121	6.96	5.68	0.00	0.00	624.00	4.27	0.29	12.26	323.71	31.41	21.39	2.12	1.06	0.02	78.40	6.81
122	6.72	5.50	0.00	0.00	601.50	4.59	0.31	11.31	313.86	31.88	20.43	2.02	1.01	0.02	73.74	8.40
123	6.05	4.99	0.00	0.00	432.00	3.38	0.23	8.93	265.98	30.07	15.86	1.57	0.79	0.02	60.71	11.84
124	6.57	5.39	0.00	0.00	1665.00	4.05	0.28	10.75	300.07	31.08	19.12	1.89	0.95	0.02	70.82	9.09
125	7.90	6.39	0.00	4.04	993.00	3.73	0.25	16.46	368.06	30.60	25.70	2.54	1.27	0.03	96.68	1.05
126	6.92	5.65	0.00	0.00	235.50	3.13	0.21	12.10	309.01	29.70	20.03	1.98	0.99	0.02	77.62	6.67
127	7.22	5.88	0.00	0.21	1428.00	3.59	0.24	13.35	329.98	30.38	22.03	2.18	1.09	0.02	83.46	5.06
128	7.87	6.37	0.00	3.85	1059.00	3.59	0.24	16.32	364.56	30.39	25.37	2.51	1.26	0.03	96.09	1.22
129	7.99	6.46	0.00	4.58	708.00	3.13	0.21	16.91	364.61	29.70	25.39	2.51	1.26	0.03	98.43	0.50
130	7.98	6.45	0.00	4.53	795.00	3.64	0.25	16.86	371.10	30.46	26.00	2.57	1.29	0.03	98.23	0.58
131	6.71	5.49	0.00	0.00	706.50	4.32	0.29	11.28	310.50	31.48	20.11	1.99	1.00	0.02	73.54	8.36
132	8.18	6.61	0.00	5.73	481.50	2.31	0.16	17.86	357.34	28.47	24.73	2.45	1.23	0.02	100.00	0.00
133	8.09	6.54	0.00	5.19	865.50	2.93	0.20	17.41	366.02	29.40	25.54	2.53	1.27	0.03	100.00	0.00
134	7.89	6.39	0.00	4.02	909.00	4.85	0.33	16.41	382.66	32.28	27.05	2.68	1.34	0.03	96.48	1.17
135	7.37	5.99	0.00	0.73	393.00	3.69	0.25	14.00	339.20	30.54	22.91	2.27	1.14	0.02	86.37	4.19
136	6.57	5.39	0.00	0.00	453.00	4.17	0.28	10.75	301.28	31.26	19.23	1.90	0.95	0.02	70.82	9.15
137	7.52	6.11	0.00	1.71	385.50	4.75	0.32	14.67	360.51	32.13	24.92	2.47	1.24	0.02	89.29	3.48
138	5.77	4.78	0.37	0.00	424.50	3.24	0.22	8.05	250.13	29.86	14.34	1.42	0.71	0.01	55.27	13.38
139	7.15	5.83	0.00	0.26	483.00	4.26	0.29	13.05	334.04	31.39	22.39	2.22	1.11	0.02	82.10	5.65
140	7.49	6.08	0.00	1.50	598.50	4.31	0.29	14.54	353.34	31.47	24.25	2.40	1.20	0.02	88.71	3.59
141	8.30	6.70	0.00	6.42	453.00	0.67	0.05	18.48	334.40	26.01	22.59	2.24	1.12	0.02	100.00	0.00
142	7.68	6.23	0.00	2.66	852.00	3.47	0.24	15.41	352.91	30.21	24.25	2.40	1.20	0.02	92.40	2.33
143	7.20	5.86	0.00	0.13	654.00	3.81	0.26	13.26	331.52	30.72	22.17	2.19	1.10	0.02	83.07	5.23
144	7.26	5.91	0.00	0.02	996.00	3.00	0.20	13.52	325.13	29.50	21.59	2.14	1.07	0.02	84.23	4.68
145	6.67	5.46	0.00	0.00	354.00	3.57	0.24	11.12	300.56	30.36	19.19	1.90	0.95	0.02	72.76	8.29
146	6.96	5.68	0.00	0.00	468.00	4.52	0.31	12.26	326.48	31.78	21.65	2.14	1.07	0.02	78.40	6.89
147	6.30	5.18	0.00	0.00	664.50	3.23	0.25	9.77	277.73	29.85	17.00	1.68	0.84	0.02	65.57	10.30
148	6.25	5.15	0.00	0.00	801.00	3.83	0.26	9.60	280.65	30.75	17.26	1.71	0.86	0.02	64.60	10.91
149	6.40	5.26	0.00	0.00	598.50	4.03	0.27	10.13	290.64	31.05	18.21	1.80	0.90	0.02	67.52	10.11
150	7.50	6.09	0.00	1.53	453.00	3.46	0.17	14.58	343.27	30.19	23.32	2.31	1.16	0.02	88.90	3.38
151	8.28	6.68	0.00	6.37	690.00	2.63	0.18	18.38	361.82	28.95	25.15	2.49	1.25	0.03	100.00	0.00
152	6.82	5.58	0.00	0.00	367.50	2.36	0.16	11.70	295.57	28.54	18.77	1.86	0.93	0.02	75.68	6.97
153	7.57	6.14	0.00	1.99	1572.00	3.89	0.26	14.90	352.42	30.84	24.18	2.39	1.20	0.02	90.26	3.04
154	7.91	6.40	0.00	4.11	1074.00	3.93	0.27	16.51	371.30	30.90	26.00	2.57	1.29	0.03	96.87	1.00
155	8.38	6.76	0.00	6.94	483.00	1.26	0.09	18.90	342.65	26.89	23.36	2.31	1.16	0.02	100.00	0.00
156	8.11	6.55	0.00	5.24	828.00	0.90	0.07	17.51	337.61	26.35	22.89	2.27	1.13	0.02	100.00	0.00
157	7.70	6.24	0.00	2.76	1470.00	2.96	0.20	15.51	347.33	29.44	23.73	2.35	1.18	0.02	92.79	2.16
158	7.79	6.31	0.00	3.35	1821.00	3.56	0.24	15.93	359.91	30.34	24.92	2.47	1.24	0.02	94.54	1.69
159	8.29	6.69	0.00	6.43	405.00	2.53	0.17	18.43	360.42	28.80	25.02	2.48	1.24	0.03	100.00	0.00
160	7.93	6.42	0.00	4.23	1084.50	3.71	0.29	16.61	369.39	30.57	25.83	2.56	1.28	0.03	97.26	0.87
161	7.83	6.34	0.00	3.51	1288.50	1.32	0.07	16.12	332.11	26.98	22.34	2.21	1.11	0.02	95.32	1.30
162	8.27	6.67	0.00	6.33	601.50	3.38	0.23	18.33	372.31	30.07	26.13	2.59	1.30	0.03	100.00	0.00

163	8.39	6.77	0.00	7.08	804.00	3.28	0.16	18.96	370.91	29.92	25.99	2.57	1.29	0.03	100.00	0.00
164	7.67	6.22	0.00	2.58	1378.50	3.00	0.20	15.36	346.30	29.50	23.63	2.34	1.17	0.02	92.20	2.33
165	8.32	6.71	0.00	6.54	519.00	0.52	0.04	18.59	332.30	25.78	22.40	2.22	1.11	0.02	100.00	0.00
166	8.80	7.08	0.00	9.54	279.00	0.65	0.03	21.20	334.12	25.98	22.57	2.23	1.12	5.45	100.00	0.00
167	7.64	6.20	0.00	2.39	1189.50	3.00	0.20	15.22	344.75	29.50	23.48	2.32	1.16	0.02	91.62	2.51
168	7.62	6.18	0.00	2.30	966.00	3.86	0.26	15.13	354.73	30.79	24.41	2.42	1.21	0.02	91.23	2.73
169	7.73	6.27	0.00	2.97	1308.00	3.41	0.23	15.65	354.76	30.12	24.43	2.42	1.21	0.02	93.37	2.03
170	8.02	6.49	0.00	4.77	706.50	3.27	0.22	17.05	370.77	29.91	25.98	2.57	1.27	0.03	100.00	0.00
171	8.16	6.59	0.00	5.66	694.50	3.78	0.26	17.76	377.91	30.67	26.65	2.64	1.32	0.03	100.00	0.00
172	7.82	6.33	0.00	3.54	1099.50	3.79	0.26	16.08	364.57	30.69	25.36	2.51	1.26	0.03	95.12	1.53
173	7.76	6.29	0.00	3.17	1029.00	3.76	0.26	15.79	360.96	30.64	25.01	2.48	1.24	0.03	93.95	1.89
174	7.86	6.36	0.00	3.85	675.00	5.28	0.36	16.27	386.74	32.92	27.43	2.72	1.36	0.03	95.90	1.39
175	6.03	4.98	0.00	0.00	364.50	4.34	0.30	8.86	273.21	31.51	16.51	1.63	0.82	0.02	60.32	12.53
176	7.88	6.38	0.00	3.94	400.50	4.31	0.29	16.37	374.81	31.47	26.32	2.61	1.30	0.03	96.29	1.21
177	6.57	5.39	0.00	0.00	796.50	3.30	0.22	10.75	292.53	29.95	18.43	1.82	0.91	0.02	70.82	8.77
178	6.27	5.16	0.00	0.00	801.00	3.31	0.23	9.67	276.90	29.97	16.92	1.67	0.84	0.02	64.99	10.52
179	7.66	6.21	0.00	2.53	1150.50	3.32	0.23	15.32	349.91	29.98	23.97	2.37	1.19	0.02	92.01	2.43
180	6.28	5.17	0.00	0.00	613.50	4.16	0.28	9.70	285.33	31.24	17.69	1.75	0.88	0.02	65.18	10.90
181	7.49	6.08	0.00	1.46	1215.00	3.23	0.22	14.54	339.87	29.85	23.00	2.28	1.14	0.02	88.71	3.40
182	7.85	6.36	0.00	3.68	865.50	2.42	0.16	16.22	347.81	28.63	23.81	2.36	1.18	0.02	95.70	1.26
183	7.94	6.42	0.00	4.23	648.00	2.23	0.15	16.66	349.73	28.35	24.00	2.38	1.19	0.02	97.45	0.76
184	8.01	6.48	0.00	4.64	574.50	1.58	0.11	17.00	347.13	27.37	23.78	2.35	1.18	0.02	100.00	0.00
185	7.70	6.24	0.00	2.72	823.50	1.84	0.13	15.51	332.75	27.76	22.38	2.22	1.11	0.02	92.79	2.03
186	7.93	6.42	0.00	4.20	696.00	3.13	0.21	16.61	361.49	29.70	25.09	2.48	1.24	0.03	97.26	0.85
187	8.04	6.50	0.00	4.88	1200.00	2.91	0.20	17.15	365.74	29.37	25.51	2.53	1.26	0.03	100.00	0.00
188	7.17	5.84	0.00	0.06	1903.50	2.84	0.19	13.14	318.63	29.26	20.97	2.08	1.04	0.02	82.48	5.15
189	7.35	5.98	0.00	0.62	732.00	3.94	0.27	13.91	341.15	30.91	23.09	2.29	1.14	0.02	85.98	4.37
190	8.34	6.73	0.00	6.67	411.00	0.86	0.06	18.69	337.05	26.29	22.84	2.26	1.13	0.02	100.00	0.00
191	7.94	6.42	0.00	4.27	615.00	3.11	0.21	16.66	361.74	29.67	25.12	2.49	1.25	0.03	97.45	0.79
192	7.81	6.33	0.00	3.50	1785.00	4.23	0.29	16.03	369.89	31.35	25.85	2.56	1.28	0.03	94.93	1.63
193	6.98	5.70	0.00	0.00	789.00	4.32	0.29	12.34	325.37	31.48	21.55	2.13	1.07	0.02	78.79	6.71
194	8.11	6.55	0.00	5.32	715.50	2.84	0.19	17.51	364.76	29.26	25.42	2.52	1.26	0.03	100.00	0.00
195	7.91	6.40	0.00	4.06	1575.00	2.71	0.18	16.51	354.75	29.07	24.46	2.42	1.21	0.02	96.87	0.94
196	7.86	6.36	0.00	3.80	876.00	4.02	0.27	16.27	369.81	31.03	25.85	2.56	1.28	0.03	95.90	1.31
197	7.54	6.37	0.00	5.60	350.00	2.65	0.16	15.76	298.90	30.47	17.45	2.21	1.11	0.02	68.23	4.30
198	8.66	6.97	0.00	8.72	565.50	2.02	0.14	20.42	353.28	28.03	24.35	2.41	1.21	5.10	100.00	0.00
199	8.24	6.84	0.00	7.12	937.00	2.63	0.09	19.49	324.78	27.04	23.49	2.33	1.16	0.02	100.00	0.00
200	7.74	6.27	0.00	3.07	1656.00	4.38	0.30	15.69	368.02	31.57	25.66	2.54	1.27	0.03	93.57	2.07
201	8.10	6.55	0.00	5.23	928.50	2.27	0.15	17.46	356.78	28.41	24.68	2.44	1.22	0.02	100.00	0.00
202	8.05	6.51	0.00	4.92	831.00	2.38	0.16	17.20	358.32	28.57	24.82	2.46	1.23	0.02	100.00	0.00
203	7.93	6.42	0.00	4.21	1066.50	3.23	0.22	16.61	362.85	29.85	25.22	2.50	1.25	0.03	97.26	0.85
204	7.31	5.95	0.00	0.32	504.00	2.64	0.18	13.74	323.40	28.96	21.44	2.12	1.06	0.02	85.21	4.31

205	7.68	6.23	0.00	2.66	961.50	3.48	0.24	15.41	353.04	30.22	24.26	2.40	1.20	0.02	92.40	2.33
206	7.66	6.21	0.00	2.53	1855.50	3.32	0.23	15.32	349.91	29.98	23.97	2.37	1.19	0.02	92.01	2.43
207	7.70	6.24	0.00	2.73	1048.50	2.17	0.15	15.51	337.04	28.26	22.78	2.26	1.13	0.02	92.79	2.07
208	8.15	6.58	0.00	5.56	1098.00	2.82	0.19	17.71	364.48	29.23	25.40	2.51	1.26	0.03	100.00	0.00
209	8.22	6.64	0.00	6.03	1095.00	3.51	0.24	18.07	374.16	30.27	26.30	2.60	1.30	0.03	100.00	0.00
210	8.10	6.55	0.00	5.29	1197.00	3.91	0.27	17.46	379.73	30.87	26.82	2.65	1.33	0.03	100.00	0.00
211	8.02	6.49	0.00	4.79	1512.00	3.78	0.26	17.05	377.91	30.67	26.65	2.64	1.32	0.03	100.00	0.00
212	7.67	6.22	0.00	2.56	1027.50	2.46	0.17	15.36	339.31	28.69	22.98	2.28	1.14	0.02	92.20	2.27
213	8.49	6.84	0.00	7.62	633.00	1.00	0.07	19.49	339.01	26.50	23.02	2.28	1.14	0.02	100.00	0.00
214	6.57	5.39	0.00	0.00	1665.00	4.05	0.28	10.75	300.07	31.08	19.12	1.89	0.95	0.02	70.82	9.09
215	8.62	6.94	0.00	8.45	717.00	1.58	0.11	20.20	347.13	27.37	23.78	2.35	1.18	4.76	100.00	0.00
216	7.99	6.46	0.00	4.56	1186.50	2.71	0.18	16.91	358.82	29.07	24.85	2.46	1.23	0.02	98.43	0.49
217	8.43	6.80	0.00	7.33	684.00	3.39	0.23	19.17	372.45	30.09	26.14	2.59	1.30	0.03	100.00	0.00
218	8.49	6.84	0.00	7.72	484.50	3.73	0.25	19.49	377.21	30.60	26.58	2.63	1.32	0.03	100.00	0.00
219	7.05	5.75	0.00	0.01	1561.50	3.55	0.24	12.63	320.52	30.33	21.12	2.09	1.05	0.02	80.15	6.05
220	7.49	6.08	0.00	1.43	738.00	2.37	0.16	14.54	329.15	28.56	22.01	2.18	1.09	0.02	88.71	3.26
221	7.78	6.30	0.00	3.26	2065.50	2.84	0.19	15.88	349.86	29.26	23.98	2.37	1.19	0.02	94.34	1.69
222	7.60	6.17	0.00	2.16	1800.00	3.42	0.23	15.04	348.04	30.13	23.78	2.35	1.18	0.02	90.84	2.79
223	8.30	6.70	0.00	6.54	507.00	3.74	0.25	18.48	377.35	30.61	26.59	2.63	1.32	0.03	100.00	0.00

NOTA: pH = reacción actual, pH* = reacción potencial, P = P disponible, K = K disponible, cal = calcáreo total, N = nitrógeno total, M.O. = materia orgánica, SB = saturación de bases, Al = aluminio cambiante, Ca = calcio cambiante, Mg = magnesio cambiante, K* = potasio cambiante, Na = sodio cambiante, C.C.C. = capacidad de cambio catiónico, Ac = acidez de cambio, C.E. = conductividad eléctrica.

Figura 20

Copia de tarjeta de recolección de datos: muestra N° 02, suelo bajo cultivo de café.

Proyecto: <u>ESTUDIO DE SUELOS DEL PRAY. SAN ANTONIO DE HUARANGO.</u>			
Complejo.....	Serie:.....	Calicata N° <u>SA-02</u>	
Clasificación natural: Soil Taxonomy <u>idem que 01</u>	7ma. FAO <u>Hta pliazozems haplics</u>	✓	
Clasificación Técnica: CUM <u>CZE (Andisol)</u>	CUP: <u>VI</u>		
Localidad: <u>Tarasana (Puno)</u>	Reg. H°.....	Reg. T°.....	
Vegetación o Cultivo <u>Café + EV.</u>	Deposito de material detrital fino y grueso		
Material Madre <u>D. De de calizas / arcillas de calizas</u>			
Fisiografía <u>Montaña alta</u>	Permeabilidad <u>Mediana</u>	Distribución de Raíces <u>hnt. 30c</u>	
Relieve <u>Ondulado</u>	Drenaje <u>Buena</u>	Salinidad o Alcalinidad.....	
Pendiente <u>70%</u>	Escorrentamiento Superficial <u>moderado</u>	Pedregosidad Superficial <u>3%</u>	
Erosión <u>No se ve</u>	Napa Freática <u>No</u>	<u>La moderada / pedregosa</u>	
Altitud (msnm) <u>10.30 (1082)</u>	Humedad <u>seca</u>		
Coordenadas <u>79° 36' 39.1 m.E y 9° 42' 48.11 m.N 9426 421</u>			
Observaciones: <u>prop. del Sr. Pedro Montero. Aljaco.</u>			
<u>Recomendación x café</u> Fecha: <u>14-01-2011</u>			
ESTUDIO DE SUELOS		Muestras: <u>SA-02(1,2)</u>	
		Foto N°.....	

clima = Subhúmedo cálido
 p.e = Superficiales

Zona de vida = bosque muy húmedo Premontano Tropical, transición a bosque húmedo Montano Tropical (bmh - PT) / (bh - MT)

Figura 21

Copia de tarjeta de recolección de datos: muestra N° 02 (reverso), suelo bajo cultivo de café.

Horizonte	Profundidad cm	COLOR		Clase Textural	Modificador Textural o Moteado	Película de Arcilla	Estructura	SISTENCIA			pH	Cos	Limite
		Seco	Húmedo					S	H	M			
A ₁	0-10/15	10YR 3/2	10YR 3/2	Fr Ar ₁	-	-	5f m 2	ld	fm	2	7.5	+	do
B _t	15-30	-	7.5YR 3/2	Fr Ar ₁	-	-	b2 fm 1	-	fm	2	7.5	+	co
C	30-70	Horizonte constituido por grues, gravillas de arena y escasa coque en proceso de redistribución, sin desarrollo radicular ni actividad biológica visible											

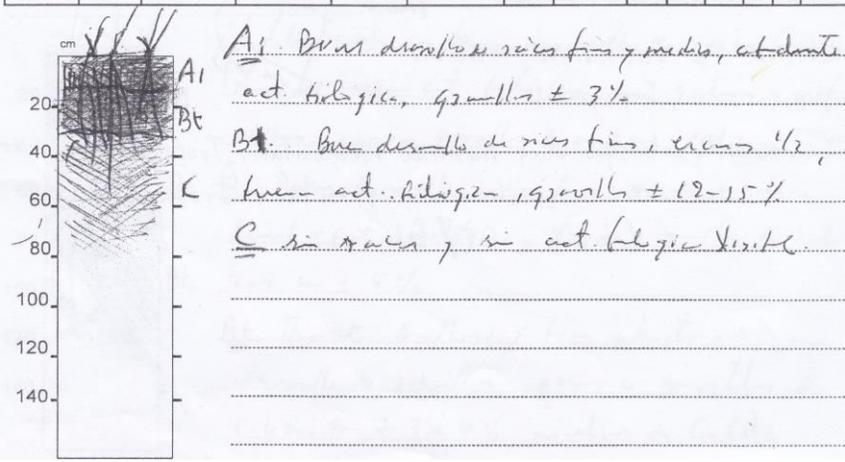


Figura 22

Copia de tarjeta de recolección de datos: muestra N° 11, suelo virgen

Proyecto: ESTUDIO AGROLÓGICO DEL PROY. SAN ANTONIO DE HUARANCO		
Complejo:	Serie: SA-01	Calicata N° SA-11
Clasificación natural: Soil Taxonomy: Idem SA-01	7ma. FAO: Alk phaeozem haplo-	
Clasificación Técnica: CUM C26(1)	CUP: VI	Vertisol crómico
Localidad: Secto. La Almendra, zona de vegetación	Reg. A°: arbustiva	Reg. T°:
Vegetación o Cultivo: Vegetación arbustiva	depositos de materiales de intemperismo gruesos de vidales	
Material Madre: Deposito calizos	depositos de calizas	
Fisiografía: Deposito fluvial	Permeabilidad: Mod. lenta	Distribucion de Raices: hasta 36 cm.
Relieve: Ondulado	Drenaje: Buena	Salinidad o Alcalinidad: -
Pendiente: 15%	Escurrimiente Superficial: Mod. lenta	Pedregosidad Superficial: 7%
Erosión: Moderada	Napa Freática: No existe en la sección de control	
Altitud (msnm): 1108 m	Humedad: Gr. todo el perfil	→ Pedregosidad
Coordenadas: 748120 mE y 942393.7		
Observaciones: Wilmer Flores Paredes.		
Fecha: 15-01-2011		
ESTUDIO DE SUELOS		Muestras: SA-11 (1, 2, 3, 4)
		Foto N°:
<p>Recomendación por: SA-01 Cacao</p> <p>clima : idem SA-01</p> <p>DB : Moderada/profunda</p> <p>Zona de vida: idem que SA-01</p>		

Figura 23

Copia de tarjeta de recolección de datos: muestra N° 11 (reverso), suelo virgen

Horizonte	Profundidad cm	COLOR		Clase Textural	Modificador Textural o Moteado	Película de Arcilla	Estructura	SISTENCIA			pH	Cos	Limite
		Seco	Húmedo					S	H	M			
A1	0-18	—	10YR 3/2	Fr-Ar-A	—	✓	Bsfm2	—	fm	ma	8.5	+	ds
Bw1	18-36	—	10YR 3/3	A1	—	✓	Bam2	—	mm	ma	8.5	+	90
Bw2	36-53	—	10YR 4/6	A1	—	✓	Bafm1	—	fm	ma	8.5	+	ds
Bw3	53-90	—	10YR 4/3	A1	—	✓	Baf1	—	fm	ma	8.5	+	—

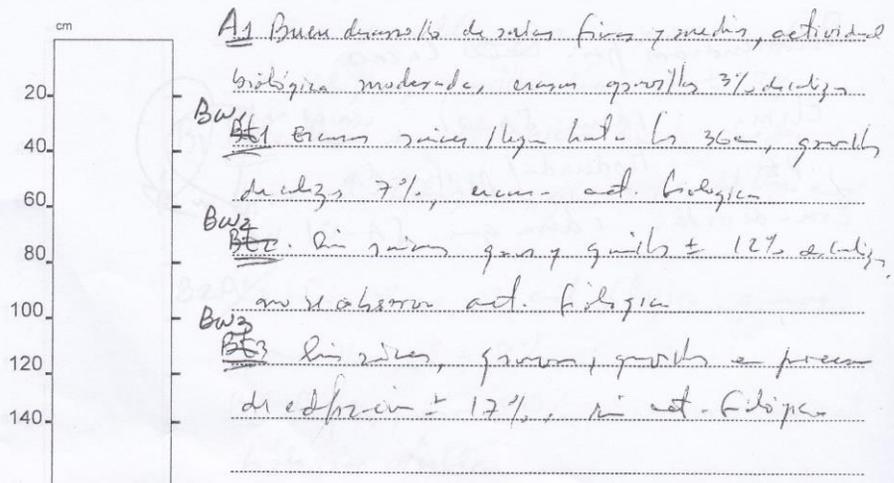


Figura 24

Copia de resultados de análisis de suelos de las muestras del N° 25 al N° 27



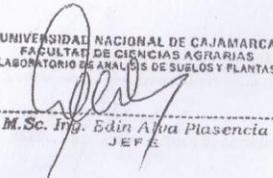
Universidad Nacional de Cajamarca
 "Norte de la Universidad Peruana"
 Facultad de Ciencias Agrarias
LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS Y PLANTAS
 TELF. 367930

Solicitante: Wilfredo Poma R. Distrito: Huarango Provincia: San Ignacio Departamento: Cajamarca

Resultados de Análisis COMPLETO de suelo

N° Muestra	SA - 25(3)	SA - 25(4)	SA - 26(1)	SA - 26(2)	SA - 26(3)	SA - 26(4)	SA - 27(1)	SA - 27(2)	SA - 27(3)	SA - 27(4)
Arena (%)	34	33	28	50	29	35	35	39	36	40
Limo (%)	12	11	23	16	14	6	19	12	17	11
Arcilla (%)	54	56	49	34	57	59	46	49	47	49
Clase textural	Ar	Ar	Ar	FrArA	Ar	Ar	Ar	Ar	Ar	Ar
Reacción actual (pH)	8,36	7,94	7,77	7,91	8,02	8,14	8,18	8,32	8,18	7,89
Reacción potencial (pH)	6,74	6,42	6,30	6,40	6,49	6,58	6,61	6,71	6,61	6,39
Al cambiable (me/100g)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Calcáreo total (%)	6,84	4,19	3,18	4,04	4,70	5,43	5,67	6,54	5,67	3,93
C. E. (µmohs/cm)	1360,50	3250,50	1183,50	1275,00	1446,00	1797,00	706,50	526,50	684,00	1030,50
M.O. (%)	1,81	1,09	2,55	2,10	1,33	1,03	0,64	0,59	0,58	2,53
N total (%)	0,14	0,09	0,20	0,17	0,10	0,08	0,05	0,05	0,05	0,20
P disponible (ppm)	18,80	16,66	15,84	16,51	17,05	17,66	17,86	18,59	17,86	16,41
K disponible (ppm)	305,27	290,25	345,51	302,88	298,62	294,50	333,97	288,29	288,20	307,92
C.C.C.(r) (me/100g)	22,71	21,63	28,82	23,15	21,99	21,55	25,96	20,89	20,88	23,80
Ca cambiable (me/100g)	19,73	18,31	23,58	19,48	19,11	18,72	22,55	18,15	18,14	19,95
Mg cambiable (me/100g)	1,95	1,81	2,33	1,93	1,89	1,85	2,23	1,80	1,80	1,97
K cambiable (me/100g)	0,98	0,91	1,17	0,97	0,95	0,93	1,12	0,90	0,90	0,99
Na cambiable (me/100g)	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Saturación de bases (%)	100,00	97,45	94,15	96,87	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	96,48
Acidez de cambio (me/100g)	0,00	0,58	1,72	0,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,87

Cajamarca, 25 de febrero del 2011



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
 FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
 LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS Y PLANTAS
 M.Sc. Ing. Edin Alva Plasencia
 JEFE

Figura 25

Copia de resultados de análisis de suelos de las muestras del N° 58 al N° 60



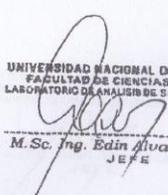
Universidad Nacional de Cajamarca
 "Norte de la Universidad Peruana"
 Facultad de Ciencias Agrarias
LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS Y PLANTAS
 TELF. 367930

Solicitante: Wilfredo Poma R. Distrito: Huarango Provincia: San Ignacio Departamento: Cajamarca

Resultados de Análisis COMPLETO de suelo

N° Muestra	SA - 58(1)	SA - 58(2)	SA - 58(4)	SA - 59(1)	SA - 59(2)	SA - 59(3)	SA - 59(4)	SA - 60(1)	SA - 60(2)	SA - 60(3)
Arena (%)	38	65	47	37	34	51	61	37	35	63
Limo (%)	14	13	25	11	13	15	17	21	13	11
Arcilla (%)	48	22	28	52	53	34	22	42	52	26
Clase textural	Ar	FrArA	FrArA	Ar	Ar	FrArA	FrArA	Ar	Ar	FrArA
Reacción actual (pH)	8,36	8,29	8,49	8,16	8,20	8,49	8,09	8,28	8,26	8,52
Reacción potencial (pH)	6,74	6,14	6,84	6,59	6,62	6,84	6,54	6,68	6,67	6,86
Al cambiante (me/100g)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Calcáreo total (%)	6,91	7,46	7,60	5,56	5,82	7,60	5,11	6,35	6,19	7,79
C. E. (µmohs/cm)	721,50	718,00	739,50	2761,50	2775,00	4428,00	4191,00	1033,50	1110,00	1195,50
M.O. (%)	3,72	0,74	0,53	1,10	1,40	0,64	0,62	2,23	1,14	0,75
N total (%)	0,25	0,07	0,04	0,07	0,11	0,04	0,04	0,15	0,09	0,05
P disponible (ppm)	18,80	17,90	19,49	17,76	17,97	19,49	17,41	18,38	18,27	19,65
K disponible (ppm)	377,07	346,78	332,44	340,41	299,63	333,98	333,70	356,28	295,98	335,52
C.C.C.(r) (me/100g)	30,58	26,56	25,80	26,65	22,10	25,96	25,93	28,35	21,71	26,13
Ca cambiante (me/100g)	26,57	23,08	22,41	23,15	19,20	22,55	22,53	24,63	18,86	22,70
Mg cambiante (me/100g)	2,63	2,28	2,22	2,29	1,90	2,23	2,23	2,44	1,87	2,25
K cambiante (me/100g)	1,32	1,14	1,11	1,15	0,95	1,12	1,12	1,22	0,94	1,13
Na cambiante (me/100g)	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	4,02
Saturación de bases (%)	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Acidez de cambio (me/100g)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Cajamarca, 25 de febrero del 2011



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
 FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
 LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS Y PLANTAS

 M. Sc. Ing. Edin Alva Plasencia
 JEFE