

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
ESCUELA DE POSGRADO



**ESTUDIO FÍSICOQUÍMICO DEL SUELO DEL SISTEMA DE ANDENERÍA
DEL CENTRO POBLADO CACRA, PROVINCIA DE YAUYOS, LIMA.**

Tesis para optar el grado de Magister en Química que presenta

GEAN PIEER RUIZ OLORTINO

Asesora:

DRA. NADIA ROSA GAMBOA FUENTES

JURADO

DR. CARLOS HENRIQUE TAVARES CORRÊA

DRA. EMMA PATRICIA MORALES BUENO

San Miguel, 2016

RESUMEN

El estudio de las propiedades físicas y químicas de los suelos permite evaluar la fertilidad del suelo que servirá para identificar las zonas más adecuadas para determinados cultivos, conservar y mejorar la productividad del suelo. El propósito de este trabajo de investigación fue evaluar los indicadores físicos y químicos que estiman la fertilidad usando los niveles de calidad de suelos en un sistema de andenería, con la finalidad de proponer indicadores que explican la variabilidad para la recuperación de la capa arable en los andenes que han sido abandonados, así revalorar y promover el reaprovechamiento de dicha tecnología para garantizar la seguridad alimentaria de la población local como parte del desarrollo sostenible agrícola.

La zona de estudio corresponde al sistema de andenería perteneciente al centro poblado de Caca, en el distrito del mismo nombre, ubicado en la margen izquierda de la parte alta de la microcuenca del río Caca, provincia de Yauyos, región Lima; cuenta con aproximadamente 40 ha (400 000m²) de áreas de cultivo. Las muestras de suelos fueron tomadas en dos periodos del año el 24 de mayo del 2015 en la época de sembrío y el segundo periodo se realizó el 19 de julio del 2015 en la época de cosecha de los cultivos en base a un patrón de muestreo de rejillas regulares y se colectaron 9 muestras superficiales de 0-30 cm de profundidad.

Para la identificación de elementos químicos en el suelo se usó el análisis de fluorescencia de rayos x y para la determinación de los indicadores fisicoquímicos se usaron métodos analíticos normalizados y referenciados. Se evaluó indicadores físicos como textura, densidad aparente y humedad; e indicadores químicos como potencial de hidrógeno, conductividad eléctrica, carbonatos, materia orgánica, nitrógeno total, nitrógeno disponible (nitratos), fósforo disponible, Azufre disponible (sulfatos), capacidad de intercambio catiónico, saturación de bases (calcio, magnesio, potasio y sodio intercambiable) y micronutrientes (cobre, cinc, hierro y cloruros).

A partir de los resultados se determinó que los suelos presentan buena compactación, textura franca arcillo arenosa y franca arenosa, salinidad baja, baja sodicidad, macronutrientes moderados, altos contenidos de micronutrientes disponibles como el hierro, cobre y zinc, presenta suelos potencialmente ácidos debido a la lixiviación de los cationes básicos y presencia de elementos generadores de acidez como son el aluminio y el hierro que proviene de la geoquímica. Por otra parte, se realizó métodos quimiométricos (análisis de componentes principales, PCA) de las variables estudiadas para encontrar la diferenciación de las áreas de cultivos.

AGRADECIMIENTOS

La realización de la presente tesis ha sido posible gracias a la subvención otorgada por el FONDECYT –CONCYTEC en virtud del CONVENIO DE GESTIÓN N°012-2013-FONDECYT, con el que se ha financiado mis estudios de posgrado. El desarrollo de la presente tesis ha resultado una experiencia única, tanto a nivel personal y profesional. Es debido a ello que me gustaría expresar mi más sincera gratitud a todas aquellas personas que han participado y colaborado para la culminación de este trabajo.

En primer lugar agradezco a Dios por haberme dado la vida, la sabiduría y la fortaleza para que fuera posible alcanzar este triunfo.

A mi madre, por ser el pilar más importante y por demostrarme siempre su cariño y apoyo incondicional.

A mi padre, a pesar que no vive conmigo siempre está pendiente de mi vida académica. Por estar dispuesto a escucharme y ayudarme en cualquier momento.

A mi asesora la Doctora Nadia Gamboa por supervisar las diferentes fases del trabajo, participando activamente en el mismo y poner a mi alcance los medios técnicos y materiales necesarios para el desarrollo de la tesis compartiendo su experiencia e instrucciones y, su apoyo ha sido de gran importancia para la culminación de este trabajo.

A mis compañeros Químicos Betty Teves y Glibver Vásquez por su compañía durante las dos salidas de campo y aliento incondicional y, su colaboración dentro del laboratorio en el análisis de los extractos acuosos.

Al Doctor Carlos H. Tavares Corrêa y Lic. Adolfo Marchese por permitirme el ingreso a las clases prácticas de laboratorio en el curso de Edafología.

Agradezco también al grupo de investigación GRIDES-PUCP por brindar materiales y reactivos en el trabajo de campo y experimental.

Al Doctor Eric G. Cosio, al Lic. Fabián Limonchi y a Alex Nina por facilitarme el análisis de nitrógeno total en el equipo Leco ©.

Al Ing. Jaime Huamán, por el interés para que se realice esta investigación y por facilitar el contacto con la Municipalidad del distrito de Caca.

A las autoridades de la comunidad campesina de Caca. Presidente Donato Julian Porta Molleda, Secretario Elmer Gustavo Roman Barboza y Tesorero Victor Armando Portas Barboza por permitir el estudio y el acceso al sistema de andenería de su

comunidad campesina. Además darnos las facilidades para la estancia en el pueblo y su disponibilidad para las entrevistas. Finalmente a los pobladores de la Comunidad Campesina de Caca, por guiarnos en los diferentes puntos de la toma de muestra de suelos.



ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Formulación del problema de investigación	3
1.2	Objetivos	5
1.2.1	Objetivo general	5
1.2.2	Objetivos específicos.....	5
2	MARCO TEÓRICO.....	6
2.1	Agricultura sostenible en un sistema de andenería.....	6
2.2	Sistema de andenería en el Perú.....	8
2.3	Causas del abandono y recuperación de un sistema de andenería	13
2.4	Recurso suelo y agroecología.....	14
2.5	Calidad de suelos	15
2.6	Indicadores de la calidad del suelo	16
2.6.1	Fertilidad física	17
2.6.2	Fertilidad química	20
2.7	Descripción del área de estudio.....	25
2.7.1	Centro poblado de Caca.....	25
2.7.2	Sistema de Andenería en el CC.PP. Caca	39
3	METODOLOGÍA.....	41
3.1	Metodología de muestreo	41
3.1.1	Frecuencia de muestreo	41
3.1.2	Estaciones de muestreo	41
3.1.3	Elección de parámetros	54
3.1.4	Toma de muestras.....	54
3.2	Metodologías analíticas	55
3.2.1	Mediciones de parámetros <i>in situ</i>	56
3.2.2	Textura en campo.....	56
3.2.3	Estructura del suelo.....	57
3.2.4	Color del suelo.....	58

3.2.5	Carbonatos.....	58
3.3	Mediciones en el laboratorio.....	59
3.3.1	Reactivos y equipos.....	59
3.3.2	Preparación de las muestras.....	63
3.3.3	Análisis Elemental por FRX.....	63
3.3.4	Determinación de textura.....	64
3.3.5	Determinación de densidad aparente.....	64
3.3.6	Determinación de carbonatos.....	65
3.3.7	Determinación de pH.....	65
3.3.8	Determinación de conductividad eléctrica.....	65
3.3.9	Determinación de humedad.....	66
3.3.10	Determinación de materia orgánica.....	66
3.3.11	Determinación de nitrógeno total.....	66
3.3.12	Determinación de nitratos.....	67
3.3.13	Determinación de fósforo disponible.....	67
3.3.14	Determinación de azufre disponible.....	67
3.3.15	Determinación de micronutrientes.....	67
3.3.16	Capacidad de intercambio catiónico.....	67
3.3.17	Manejo de residuos.....	68
4	RESULTADOS.....	69
4.1	Resultados de parámetros en campo.....	69
4.1.1	Color.....	69
4.1.2	Estructura.....	69
4.1.3	Textura.....	69
4.1.4	Carbonatos.....	69
4.2	Resultados de parámetros en laboratorio.....	71
4.2.1	FRX.....	71
4.2.2	Textura.....	73
4.2.3	Densidad.....	74

4.2.4	Carbonatos.....	75
4.2.5	pH.....	75
4.2.6	Conductividad eléctrica.....	77
4.2.7	Humedad.....	78
4.2.8	Materia orgánica.....	79
4.2.9	Nitrógeno total	80
4.2.10	Nitratos y sulfatos	81
4.2.11	Fosfatos y cloruros	82
4.2.12	Micronutrientes	83
4.2.13	Capacidad de intercambio catiónico	85
4.2.14	Calcio, magnesio, potasio y sodio intercambiable.....	85
4.3	Aseguramiento de la calidad de resultados	86
5	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	90
5.1	Textura	90
5.2	Densidad aparente	90
5.3	pH.....	91
5.4	Conductividad eléctrica y cloruros	93
5.5	Humedad.....	94
5.6	Materia orgánica.....	95
5.7	Nitrógeno total y mineral.....	97
5.8	Fosfatos y sulfatos.....	99
5.9	Micronutrientes	100
5.10	CIC	103
5.11	Calcio, magnesio, potasio y sodio intercambiable.....	104
5.12	Influencia de los indicadores sobre la fertilidad.....	107
6	CONCLUSIONES.....	115
7	RECOMENDACIONES.....	117
8	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	118
9	ANEXOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	128

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Construcción de andenes.	8
Figura 2: Clases texturales según la USDA	18
Figura 3: Influencia del pH del suelo sobre la asimilación de los nutrimentos	21
Figura 4: Rangos de pH apropiado para determinados cultivos	22
Figura 5: Ubicación del CC.PP. Caca a nivel departamental, provincial y distrital.....	27
Figura 6: Ubicación de la estación meteorológica Yauyos. Mapa geológico	28
Figura 7: Promedio anual de temperatura- Yauyos.....	29
Figura 8: Promedio anual de precipitación – Yauyos	30
Figura 9: Promedio anual de humedad relativa – Yauyos	30
Figura 10: Promedio anual de velocidad del viento – Yauyos	31
Figura 11: Rosa de vientos para un año normal – Estación de verano	32
Figura 12: Rosa de vientos para un año normal – Estación de invierno	32
Figura 13: Promedio anual de horas de sol – Yauyos.....	33
Figura 14: Mapa geológico del CC.PP. Caca.....	35
Figura 15: Población total por grupos de edad.....	37
Figura 16: Población por condición de actividad económica	38
Figura 17: Esquema metodológico de investigación.	43
Figura 18: Estación de monitoreo de suelos en el CC.PP. Caca	44
Figura 19: Estación de muestreo I-30% realizada el 24/05/2015.	46
Figura 20: Estación de muestreo I-60% realizada el 24/05/2015	47

Figura 21: Estación de muestreo I-90% realizada el 24/05/2015	48
Figura 22: Estación de muestreo M-30% realizada el 24/05/2015.....	49
Figura 23: Estación de muestreo M-60% realizada el 24/05/2015.....	50
Figura 24: Estación de muestreo M-90% realizada el 24/05/2015.....	51
Figura 25: Estación de muestreo D-30% realizada el 24/05/2015.....	52
Figura 26: Estación de muestreo D-60% realizada el 24/05/2015.....	53
Figura 27: Estación de muestreo D-90% realizada el 24/05/2015.....	54
Figura 28: Determinación de la textura de las muestras de suelos en campo.....	57
Figura 29: Determinación de la estructura del suelo	57
Figura 30: Determinación de color de las muestras de suelos	58
Figura 31: Estimación de carbonatos en campo	59
Figura 32: Determinación de la densidad aparente.....	65
Figura 33: Análisis de FRX para los suelos CC.PP. Caca.....	72
Figura 34: Calificación de la fertilidad con respecto a la densidad aparente.	91
Figura 35: Calificación de la fertilidad con respecto al pH (1:1).....	92
Figura 36: Calificación de la fertilidad con respecto al pH (KCl 1M)	93
Figura 37: Calificación de la fertilidad con respecto a la CE.....	94
Figura 38: Determinación de humedad y correlación entre arcilla - materia orgánica..	95
Figura 39: Correlación entre la Materia orgánica y densidad aparente	96
Figura 40: Calificación de la fertilidad con MO	97
Figura 41: Calificación de la fertilidad con respecto al nitrógeno total.	98

Figura 42: Calificación de la fertilidad con respecto al nitrato.....	98
Figura 43: Calificación de la fertilidad con respecto al fósforo.....	99
Figura 44: Calificación de la fertilidad con respecto al sulfato	100
Figura 45: Correlación entre la MO y los micronutrientes disponibles en el suelo.	101
Figura 46: Calificación de la fertilidad con respecto al hierro.....	102
Figura 47: Calificación de la fertilidad con respecto al cobre.....	102
Figura 48: Calificación de la fertilidad con respecto al cinc	103
Figura 49: Calificación de la fertilidad con respecto a la CIC.....	104
Figura 50: Porcentaje de saturación de sodio	105
Figura 51: Calificación de la fertilidad con respecto al calcio.....	105
Figura 52: Calificación de la fertilidad con respecto al magnesio	106
Figura 53: Calificación de la fertilidad con respecto al potasio	106
Figura 54: Calificación de la fertilidad con respecto al %SB.....	107
Figura 55: Gráfica de los números de componentes.....	108
Figura 56: Gráfica de las puntuaciones de las observaciones.....	109
Figura 57: Gráfica bidimensional de la influencia de las variables considerando las puntuaciones de las observaciones.	110

ÍNDICE TABLAS

Tabla 1: Clasificación de andenes según diferentes criterios.....	9
Tabla 2: Estado de conservación de los andenes	11
Tabla 3: Superficie de andenes de acuerdo con el estado de conservación y uso.....	12
Tabla 4: Descripción de la forma y tamaño de la estructura.....	18
Tabla 5: Descripción del grado de los agregados	19
Tabla 6: Relación entre densidad aparente y porcentaje de porosidad total en base a la textura del suelo	19
Tabla 7: Relación de la distribución de poros y de la textura.....	20
Tabla 8: Tabla Salinidad del suelo	23
Tabla 9: Relaciones entre tipo de coloide y CIC.....	24
Tabla 10: Relaciones entre textura del suelo y la CIC.....	25
Tabla 11: Ubicación de la estación meteorológica.....	26
Tabla 12: Población económicamente activa por grupos de edad y rama de actividad económica	38
Tabla 13: Estación de monitoreo en suelos	45
Tabla 14: Metodologías analíticas para los análisis de suelos	56
Tabla 15: Reactivos utilizados en el laboratorio	60
Tabla 16: Equipos utilizados en el laboratorio	62
Tabla 17: Resultados de parámetros realizados en campo.....	70
Tabla 18: Resultados de la textura del suelo en laboratorio realizado el 24/05/15.	73
Tabla 19: Resultados de la textura del suelo en laboratorio realizado el 19/07/15.	74

Tabla 20: Resultados de la densidad aparente en las dos campañas en muestras inalteradas.....	75
Tabla 21: Resultados del pH extracto 1:1 en las dos campañas medidas en el laboratorio.....	76
Tabla 22: Resultados del pH con KCl 1N en las dos campañas medidas en el laboratorio.....	77
Tabla 23: Resultados de la conductividad eléctrica en las dos campañas medidas en el laboratorio.....	78
Tabla 24: Resultados del porcentaje de humedad en las dos campañas medidas en laboratorio.....	79
Tabla 25: Resultados de materia orgánica en las dos campañas medidas en el laboratorio.....	80
Tabla 26: Resultados de nitrógeno total por combustión.....	81
Tabla 27: Resultados de nitrógeno total por Kjeldahl y relación C/N.....	81
Tabla 28: Resultado de la determinación de nitratos y sulfatos.....	82
Tabla 29: Resultado de la determinación de fosfatos y cloruros.	83
Tabla 30: Resultados de los micronutrientes.	84
Tabla 31: Resultados de capacidad de intercambio catiónico en las dos campañas medidas en el laboratorio.....	85
Tabla 32: Resultados de los nutrientes Ca, Mg, K y Na extraíbles.	87
Tabla 33: Exactitud, límite de cuantificación y detección.....	88
Tabla 34: Aseguramiento y control de calidad de muestreo	89
Tabla 35: Influencia de las variables sobre la diferenciación de las observaciones...	111

Tabla 36: Indicadores fisicoquímicos de la fertilidad de los suelos..... 112

Tabla 37: Evaluación de los indicadores de fertilidad para el perfil I 113

Tabla 38: Evaluación de los indicadores de fertilidad para el perfil M 113

Tabla 39: Evaluación de los indicadores de fertilidad para el perfil D..... 113

Tabla 40: Clasificación de los suelos y sus limitantes de su fertilidad 114



ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

AAS	Atomic Absorption Spectroscopy
APHA	American Public Health Association, USA
ASTM	American Society for Testing and Materials
CC.PP.	Centro poblado
CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
C.E.	Conductividad eléctrica
CIC	Capacidad de intercambio catiónico
D.A.	Densidad aparente
EPA	Environmental Protection Agency, USA
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
GEOCATMIN	Sistema de Información Geológico y Catastral Minero
GPS	Global Positioning System
Ha	Hectáreas
IGN	Instituto Geográfico Nacional
INEI	Instituto Nacional de Estadística e Informática, Perú
IMP	Instituto Mexicano del Petróleo
INGEMMET	Instituto Geológico Minero y Metalúrgico
ICS	Índices de calidad de suelos
INRENA	Instituto Nacional de Recursos Naturales
LOD	Limit of detection
LOQ	Limit of quantification
MINAGRI	Ministerio de Agricultura y Riego, Perú
MINAM	Ministerio del Ambiente, Perú
MO	Materia orgánica
NPK	Nitrógeno, fósforo y potasio

NCS	Nivel de calidad de Suelo
pH	Potencial de hidrógeno
ONERN	Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales
ONG	Organización no Gubernamental
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
PRONAMACHCS	Programa Nacional de Manejo de Cuencas Hidrográficas y Conservación de Suelos
PSI	Porcentaje de sodio intercambiable
%SB	Porcentaje de saturación de base
SENAMHI	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología, Perú
SNIP	Sistema Nacional de Inversión Pública
USDA	United States Department of Agriculture
USDANRCS	United States Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service, USA
UTM	Universal Transverse Mercator
UV	Ultravioleta

1 INTRODUCCIÓN

La sostenibilidad, desde los puntos de vista agronómico, económico y ambiental, conlleva preservar y/o mejorar la capacidad productiva del sistema y la calidad de los recursos renovables y no renovables contenidos en el sistema productivo (suelo, agua, aire, biodiversidad) [1]. Mientras, la agricultura sustentable es aquella respuesta a la preocupación por la degradación de los recursos naturales asociada a la actividad agrícola que, en largo plazo, contribuye a mejorar la calidad ambiental y los recursos. Dentro de estos recursos se encuentra el suelo como recurso finito no renovable [2,3].

El suelo es un componente central de los recursos de tierra, la base del desarrollo agrícola y la sostenibilidad ecológica que garantiza el sustento para la población humana, así como ingresos sostenidos para un país [4]. En la actualidad, desde una perspectiva global, la mayor preocupación es determinar los niveles críticos de la capacidad de soporte del suelo para una población que, se estima, se duplicará para el 2050 a 9000 millones de habitantes. La demanda de alimento es cada vez mayor por la creciente población mundial generando altos índices de desnutrición o un uso intensivo del recurso suelo, los cuales afectan la calidad del mismo. Además se sabe que 1900 millones de hectáreas de tierra se han vuelto degradadas mundialmente desde 1950 hasta 1988. Tras esto se genera el problema al riesgo de una explotación excesiva. Si la población aumenta en un mundo con escasez de alimento, es probable que los humanos exploten y degraden la tierra cada vez más [5,6].

El recurso suelo, a pesar de su importancia socioeconómica, no ha recibido la atención necesaria, muy a lo contrario tanto la presión demográfica como las diversas actividades que se realizan sobre ella han acelerado su degradación física, química y biológica, con consecuencias sociales y económicas negativas, tales como la reducción de la productividad y disminución de áreas de cultivo [7]. Ante esta situación, en medio de una conciencia ambiental que crece, surge la necesidad de recuperar y conservar la calidad del suelo. Por ello, una de las primeras acciones es tener el adecuado y más completo conocimiento de la calidad y manejo de los suelos agrícolas [8].

La calidad del suelo no solo abarca un componente, por esto, para captar la naturaleza holística de la calidad deberán ser medidos todos los parámetros como salud o producción agrícola. Sin embargo, no todos los parámetros tienen la misma relevancia para todos los suelos o situaciones. Un grupo mínimo de propiedades del suelo, o indicadores son seleccionados sobre la base de su aptitud para indicar la capacidad del suelo para funcionar en usos y climas determinados [9].

La fertilidad del suelo se evalúa de dos maneras: la primera es realizar mediciones periódicamente para monitorear cambios o tendencias en la calidad del suelo y la segunda es realizar comparaciones de valores medidos con los de una condición del suelo estándar o de referencia. Es necesario evaluar y monitorear dicha calidad para mejorar o conservar la fertilidad y la productividad del suelo, garantizando la sustentabilidad de los agroecosistemas. Por lo tanto, como parte de las estrategias para lograrlo, resultan indispensables la selección y el uso de indicadores de calidad que proporcionen información sobre los cambios generados en las propiedades edáficas como consecuencia del uso y del manejo [10].

Los estudios de las propiedades físicas y químicas del suelo, son importantes ya que diagnostican problemas nutricionales en suelos y/o cultivos y, en base a ellos, se hacen recomendaciones. La nutrición es evaluada a través de síntomas visuales en las plantas, análisis de suelo y de plantas. El análisis de suelo es el más usado por los agricultores sobre la base de que, conociendo el nivel de nutrimentos, se puede hacer un plan de fertilización adecuado. Entre los análisis de suelo existen los de rutina (pH, textura, conductividad eléctrica, materia orgánica, fósforo, potasio, calcio y magnesio) y algunos análisis adicionales que se realizan en base a solicitudes especiales e incluyen la determinación de la capacidad de intercambio de cationes, porcentaje de saturación con bases, contenidos de nitratos, azufre y micronutrientes [11].

El sistema de andenería en el país contribuye al desarrollo sostenible de la población local ya que logra domesticar cultivos en zonas de montañas y mitigar cambios climáticos al producir un cambio en la pendiente del terreno, conservar su capacidad de retención de humedad y, reducir la erosión y transporte de sedimentos [12]. Según los datos oficiales del Instituto Nacional de Recursos Naturales (INRENA) realizados en 1996 se estima 256,945 hectáreas (ha) de las cuales más del 50 % se encuentran en situación de abandono y la región Lima cuenta con casi 80 mil hectáreas de andenes, ocupando el primer lugar a nivel nacional [13]. En los últimos años se ha llegado a aprobar proyectos de recuperación de andenes con financiamiento del estado que están más relacionados al estudio de su infraestructura y no a la evaluación de los indicadores de sustentabilidad en este agroecosistema [14–16].

La Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales (ONERN) realizó un análisis de suelos en la cuenca del río Cañete, región Lima que se realizó en junio de 1970 [17]. La Dirección General de Investigación Agraria de La Molina usando determinados índices de calidad estimó la de fertilidad de los suelos en todo el Perú en el año 1973 y costa del Perú en 1980 [18,19]. Acerca de las investigaciones que monitorean y

evalúan las propiedades edáficas de las terrazas o andenes de los suelos andinos están las evaluaciones de la calidad mediante la comparación a lo largo de las terrazas, como en el valle de Pacay (Junín- Perú) y evaluaciones de la fertilidad en San Pedro de Laraos (Lima-Perú) [20,21]. También en las zonas andinas ecuatorianas evalúan la variabilidad espacial de las propiedades del suelo en las terrazas usando métodos estadísticos de clasificación como el análisis de clúster que permite descubrir asociaciones y estructuras en los datos que no son evidentes a priori según algún criterio de homogeneidad [22].

La región Caca es un distrito de la provincia de Yauyos en la región Lima. Es una región que tiene un índice de pobreza y desnutrición elevado siendo calificada como pobre y posee una tasa de desnutrición para niños de 6-9 años del 20-35% [23]. El 41% de la población son pobres del cual 16,2% vive en extrema pobreza según el último mapa de pobreza provincial y distrital del 2009 [24]. En este contexto, el análisis de los indicadores fisicoquímicos estimará la fertilidad en el sistema de andenería del CC.PP. de Caca que cuenta con 400 ha de áreas de cultivo. Para ello se usarán métodos quimiométricos y análisis de los índices de calidad de suelos. Así se clasificarán las zonas de estudio por su capacidad de uso mayor según el D.S. N°017-2009-AG del Ministerio de Agricultura [25–27]

1.1 Formulación del problema de investigación

Los suelos agrícolas constituyen la base para el desarrollo sostenible de la agricultura, las funciones esenciales de los ecosistemas y la seguridad alimentaria y, por lo tanto, son la clave para sostener la vida en la Tierra. La agricultura actual intenta alcanzar máxima productividad empleando riego en condiciones inadecuadas, malas artes de labranza, el cultivo extensivo de los suelos y la enorme dependencia de fertilizantes y pesticidas, químicos para mantener y mejorar el crecimiento de cultivos. Todo ello, sumado a la explotación indiscriminada de los recursos naturales como consecuencia del incremento de la demanda de alimentos, cosechas, pastos, madera, etc., ha conducido a la degradación de los suelos [28].

Para desarrollar la sostenibilidad agrícola y así garantizar la seguridad alimentaria se debe conocer la condición actual que presenta el suelo agrícola por sus propiedades fisicoquímicas para evaluar la calidad de suelos según su uso. Estos estudios del suelo son importantes ya que logran diagnosticar problemas de degradación y de nutrición en suelos y/o cultivos. En base a ellos se hacen recomendaciones para la restauración de suelos degradados o la mejora de su productividad sin alterar o

desgastar los recursos naturales propiciando los cambios de uso y manejo agrícola para garantizar una mayor eficiencia y productividad en las áreas de cultivo [29,30].

Actualmente, la zona de Caca es una región que tiene un índice de pobreza y desnutrición elevado y posee andenes abandonados que muy probablemente fueron creados en el periodo incaico [12]. Al necesitar tierras de cultivo adicionales a las que les ofrecían sus estrechos valles, estos andenes podrían ser utilizados en la actualidad para el desarrollo de actividades agrícolas y fortalecer su auto sostenibilidad alimentaria si se logra demostrar científicamente que sus suelos aún conservan los elementos nutritivos en las formas, cantidades y proporciones requeridas para lograr un buen crecimiento y rendimiento de las plantas. Para ello, es necesario realizar un diagnóstico de la fertilidad de suelos que permitirá conocer la aptitud agrológica en los andenes abandonados que se encuentran en las zonas altas de Caca comparados con otros andenes del mismo centro poblado donde se realizan actividades de cultivos de maíz, habas, papa, albaricoque, etc.

El estudio de las propiedades físicas y químicas de los suelos permitirá evaluar su fertilidad para identificar las zonas más adecuadas para determinados cultivos, conservar y mejorar la productividad del suelo. Para ello, se ha seleccionado trabajar en una zona de cultivo en andenería tradicional que se encuentra en una zona calificada de pobre según el INEI (2009) ya que, los andenes constituyen el sistema de ingeniería hidráulica que permitió a nuestros antepasados enfrentar los problemas climáticos, así como la posibilidad de extender zonas agrícolas. Además, debido a la insuficiencia de datos históricos con respecto a las evaluaciones de calidad ambiental y de fertilidad agrícola en el centro poblado Caca este trabajo busca aportar información para estudios posteriores como la aprobación de proyectos de recuperación de andenes que ya se ha venido dando en la región Lima [24].

El propósito de este trabajo de investigación fue evaluar los indicadores físicos y químicos que estiman la fertilidad del suelo usando como referencia índices de calidad de suelos en un sistema de andenería, con la finalidad de identificar los puntos críticos del manejo de los andenes en la capa arable que han sido abandonados y así revalorar y promover el reaprovechamiento de dicha tecnología para garantizar la seguridad alimentaria de la población local como parte del desarrollo sostenible agrícola.

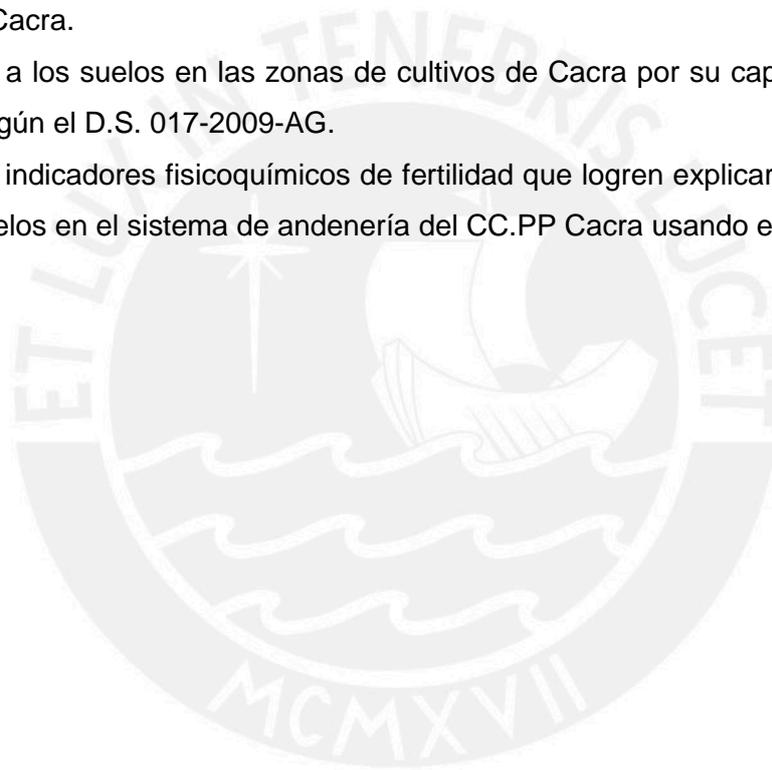
1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

El objetivo del presente trabajo consiste en evaluar la fertilidad de los suelos agrícolas en el sistema de andenería del centro poblado de Caca, provincia de Yauyos, región Lima con el fin de contribuir con el desarrollo socioeconómico de los pueblos rurales.

1.2.2 Objetivos específicos

- Analizar los indicadores fisicoquímicos que estiman la fertilidad del suelo en el sistema de andenería del centro poblado Caca.
- Diseñar un plan de monitoreo de suelo en el sistema de andenería del centro poblado Caca.
- Clasificar a los suelos en las zonas de cultivos de Caca por su capacidad de uso mayor según el D.S. 017-2009-AG.
- Proponer indicadores fisicoquímicos de fertilidad que logren explicar la variabilidad de los suelos en el sistema de andenería del CC.PP Caca usando el PCA.



2 MARCO TEÓRICO

2.1 Agricultura sostenible en un sistema de andenería.

La sostenibilidad de la producción agrícola es un tema principal de interés para la población debido a que la agricultura es la fuente primaria de alimentos. Una agricultura sustentable debe satisfacer las necesidades, en cantidad y en calidad, de una población mundial en continua expansión, mejorar su nivel de vida sin deterioro del ambiente y reducir la pobreza, brindando a la vez mayores y mejores oportunidades de empleo que permiten alcanzar el desarrollo humano [31,32].

Hoy en día la problemática contemporánea de la producción agrícola ha evolucionado de una dimensión exclusivamente técnica, a otra de dimensiones más sociales, económicas, políticas, culturales y ambientales. El concepto de agricultura sustentable es útil porque captura un conjunto de preocupaciones sobre la agricultura concebida como un sistema tanto económico, como social y ecológico. La comprensión de estos tópicos más amplios sobre la agricultura requiere entender la relación entre la agricultura y el ambiente global, ya que el desarrollo agrícola depende de la interacción de subsistemas biofísicos, técnicos y socioeconómicos. Así, la agricultura convencional ha promovido la necesidad de realizar ajustes para que esta se vuelva ambiental, social y económicamente viable y compatible [33].

Al analizar los diferentes conceptos de agricultura sostenible en respuesta a la preocupación por “la degradación de los recursos naturales se puede definir un sistema de producción agrícola como aquel que mantiene un nivel de productividad aceptable que satisface necesidades prevalentes y está continuamente adaptándose a las necesidades futuras para aumentar la capacidad de conservación de los recursos naturales y otras necesidades humanas” [34]. Así, las dos principales características de la agricultura sostenible son la eficiencia en la producción de alimentos y el mantenimiento de los recursos naturales. La agricultura sustentable solo será viable y eficiente si se obtiene niveles de productividad elevada. Dentro de la perspectiva de la conservación de los recursos naturales, es de prioridad conservar el recurso suelo y para ello es el manejo adecuado de suelos a través de tecnologías que no tengan impactos negativos en lo económico, social y ambiental [34,35].

Para conservar los recursos naturales la idea es desarrollar agrosistemas o tecnologías agrícolas con mínima dependencia de altos insumos agroquímicos para no alterar las propiedades naturales del suelo, mejorando así la eficiencia biológica y económica y también la protección del medio ambiente [36].

La conservación de los recursos naturales ha sido de vital importancia para la seguridad alimentaria en los pueblos andinos. En la época prehispánica lograron el manejo de grandes extensiones a través de la tecnología de sistemas de andenería que requieren de oportuna acción colectiva para su mantenimiento, pero desde la conquista, los sistemas de andenes han sido discriminados debido a su localización geográfica [37].

Según la definición del Instituto Nacional de Recursos Naturales (INRENA) los andenes resultan de la construcción de muros de piedra de modo tal que logran modificar la pendiente de las laderas generando plataformas escalonadas de superficie plana. Esta infraestructura agrícola demuestra un desarrollo en el que las restricciones medioambientales y geológicas y, los cambios de clima constituyeron un estímulo para las culturas de lograr la transformación, productividad y conservación de laderas de los pueblos andinos. Se reconoce que con la construcción de sistemas de andenerías las culturas han modificado y embellecido el paisaje silvestre apoyando al hombre en la seguridad alimentaria y su desarrollo cultural y económico [37].

Los andenes conforman un sistema de ingeniería hidráulica que permitió a los antiguos agricultores confrontar los problemas de erosión de suelos, déficit de agua y existencia de heladas, así como la posibilidad de extender zonas agrícolas. Sin embargo, a pesar de su importancia para la subsistencia de los pobladores en las zonas rurales, en donde prevalecen elevados niveles de extrema pobreza, es muy poco lo que se ha hecho para conservarlos [38]. Esta tecnología fue desarrollada por las culturas tardías hasta que los Incas revolucionaron otra vez el modelo del andén, al diseñar una forma más estable con un muro inclinado y diferentes capas de suelo, escogidos a efectos de retener la humedad y obtener un buen drenaje. Además siempre tiene asociado a manejos de conservación de suelos y sistemas de riego [39].

Los andenes en buen estado de conservación son ventajosos para la producción agroecológica. Son varios factores físicos, que se originan en la construcción de las plataformas y muros de contención, que favorecen la humedad y temperatura del suelo y son adaptados a cambios climáticos. Estos microclimas pueden ser apropiados para la eliminación de algunas plagas que generan daños a los cultivos y/o favorecer un ambiente adecuado para determinados microorganismos en el suelo que generan una mayor domesticación para determinados cultivos. Los muros de piedra tienen la capacidad de absorber el calor del sol e irradiarlo durante la noche, desviando o modificando vientos y heladas, con mayor efecto en andenes pequeños o estrechos. Esto estimula una germinación más rápida, mayor crecimiento vegetativo y, por ende

se incrementa el rendimiento. Su estabilidad explica la reducción de los riesgos de erosión y su resistencia ante sismos. Por su ubicación geográfica y tipo de paisaje, es apto para una agricultura sustentable[39,40].

2.2 Sistema de andenería en el Perú.

El territorio peruano se encuentra atravesado por la cordillera de los Andes de sur a norte lo que genera un relieve accidentado. En el periodo incaico las sociedades andinas prehispánicas acondicionaron las laderas de pendiente pronunciada mediante la construcción de plataformas horizontales escalonadas, conocidas localmente como andenes como se muestra en la Figura 1. Los andenes son una tecnología propia del medio andino, resultado de la observación y coexistencia del hombre antiguo con su espacio. Estos son plataformas continuas, construidas de forma escalonada en las laderas de cerros con pendientes entre 4 a 60% que permitían el control de la escorrentía y la calidad del agua, una alta eficiencia en el uso de agua en la irrigación por gravedad, una erosión reducida y una alta diversidad de cultivos en las micro cuencas en donde se localizaban.[40] Para la clasificación de los andenes, CEPAL (1989) efectuó una sistematización de andenes estableciendo 18 tipos como se muestra la Tabla 1 [41].

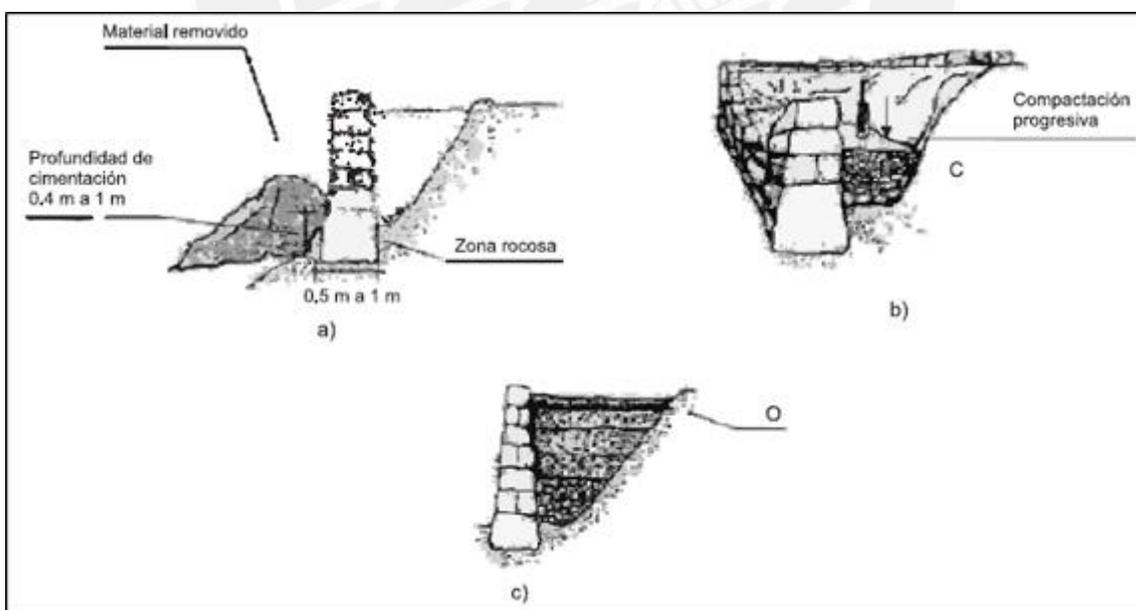


Figura 1: Construcción de andenes.

- a) Inicio de cimentación. b) Levantamiento de muro y relleno de material filtrante.
- c) Compactación de material de relleno y colocación de material orgánico [12].

Tabla 1: Clasificación de andenes según diferentes criterios [12].

Criterio de clasificación	Tipos de andenes
Según su ubicación geográfica	(1) De quebradas (2) De laderas (3) De fondo de valle
Según el manejo del agua	(4) De secano (5) De riego
Según el origen del suelo	(6) Con suelo <i>in situ</i> (7) Con suelo transportado
Según su diseño o arquitectura	(8) Refinados (9) Rústicos
Según su función	(10) Agrícolas (11) Militares (12) Religiosos
Según su estado de conservación	(13) Bien conservados (14) Medianamente conservados (15) Derruidos
Según su uso actual	(16) Con uso permanente (17) Con uso temporal (18) Sin uso

El inventario Nacional de andenes fue realizado en ocho regiones del Perú por INRENA (1996) donde el 15.7 % del total de andenes inventariados (256 945 ha) está sin uso como se observa en la Tabla 2. Lima ocupa el 30,9% de la superficie total de andenes en el Perú como se muestra en la Tabla 3 [13].

El inventario realizado por Agro Rural (2012) en 11 regiones del Perú contienen sistemas de andenería que ocupan una superficie total de más de 340 mil hectáreas; no obstante, más de 80 mil hectáreas (24%) están abandonados y, por ende, en un mal estado de conservación, perdiéndose así superficie agrícola.[42] En los últimos años ha habido un renovado interés por parte del Estado y de diferentes organizaciones no gubernamentales (ONGs) en el potencial que tienen las terrazas agrícolas y desde los años 80 se iniciaron las actividades de rehabilitación, tanto por las ONGs como por las instituciones del Estado, siendo el MINAG, a través del PRONAMACHCS, el que ha efectuado el mayor trabajo de reconstrucción. Para 1999, el PRONAMACHCS había rehabilitado 9000 ha y construido 3000 ha de andenes en el periodo 1981 y 1998[43,44].

Los andenes de cultivos en el Perú fueron extensivamente utilizados para plantar muchos productos, aunque el maíz y la papa fueron los cultivos que más se adaptaron a esta compleja técnica agrícola actualmente (2015) ya se realizan cultivos de frutales debido a la demanda. Esta antigua tecnología se utiliza de manera frecuente y sigue siendo la mejor solución para la agricultura en lugares montañosos [45].

Tabla 2: Estado de conservación de los andenes [12].

ITEMS	CLASIFICACIÓN	Ha	Porcentajes
A1	Bien conservados con uso permanente	13 565	5,3%
A2	Bien conservados con uso temporal	11 025	4,3%
B1	Moderadamente conservados con uso permanente	31 025	12,1%
B2	Moderadamente conservados con uso temporal	76 160	29,6%
B3	Moderadamente conservados sin uso agrícola	105	0,0%
C1	Derruidos con uso permanente	400	0,2%
C2	Derruidos con uso permanente	84 305	32,8%
C3	Derruidos sin uso agrícola	40 360	15,7%
	Total de andenes inventariados	256 945	100,0 %

Tabla 3: Superficie de andenes de acuerdo con el estado de conservación y uso [12].

Tipo de Andén	A1	A2	B1	B2	B3	C1	C2	C3	Total	%
Arequipa	3,260	6,775	10,195	11,855	-	-	6,120	10,140	48,345	18.8
Apurímac	-	-	25	6,260	-	-	15,430	905	22,620	8.8
Cusco	875	430	4,395	2,990	105	90	13,610	1,180	23,675	9.2
Ica	-	-	160	915	-	310	960	1,000	3,345	1.3
Lima	3,055	945	4,950	28,315	-	-	28,405	13,710	79,380	30.9
Moquegua	4,960	450	4,500	2,830	-	-	910	5,735	19,385	7.6
Puno	-	2,425	-	20,895	-	-	17,715	5,685	46,720	18.2
Tacna	1,410	-	6,780	2,100	-	-	1,155	2,035	13,480	5.2
ha	13,560	11,025	31,005	76,160	105	400	84,305	40,390	256,950	
%	5.3	4.3	12.1	29.6	0.0	0.2	32.8	15.7	100.0	100.0

2.3 Causas del abandono y recuperación de un sistema de andenería

El andén agrícola es una superficie horizontal hecha con los siguientes propósitos: Reducir las pendientes, el flujo de las aguas a un régimen no erosivo, mantener la tierra vegetal y manejar el agua eficientemente.

Entre los factores agroecológicos y socioeconómicos que se mencionan como factores que han contribuido a la falta de mantenimiento o al abandono de los sistemas de andenería están los siguientes: [44].

- Cambio climático y desertificación.
- Falta de control de las especies exóticas forrajeras y arbóreas introducidas.
- Disminución de la población. Actualmente, la población joven emigra a las ciudades ya sea para proseguir su estudios o para vender su fuerza de trabajo no calificada en donde su remuneración es mucho más alta que en la sierra. Los jóvenes perciben mayores atracciones y oportunidades en las ciudades. Esta escasez de mano de obra se relaciona con el deficiente mantenimiento y eventual abandono de los sistemas de andenería.
- Baja competitividad de los productos en razón de la localización y de los altos costos de transporte.
- Falta de crédito y de estrategias de mercado; el crédito es esencial para la obtención de semilla mejorada y otros insumos, o bien, para introducir el producto al mercado.

La rehabilitación de los sistemas de andenería prehispánicos es técnicamente factible dentro de las leyes del patrimonio vivo, valora a la cultura andina y puede contribuir al alivio de la pobreza y al manejo sostenible de los recursos naturales utilizando un enfoque interdisciplinario y agroecológico. Los andenes son ideales para abrir mercados a productos orgánicos por sus características auténticas y escala pequeña de productividad. Según, David Guillet para la recuperación y mantenimiento de un sistema de andenería se debe tener en cuenta la calidad del suelo, la gestión de los recursos naturales y el riego [45,46].

2.4 Recurso suelo y agroecología.

El suelo, un concepto evidente para todos los que cotidianamente desarrollan su vida sobre él y que se alimentan de lo que genera la agricultura en esta delgada capa arable que envuelve la superficie de la tierra, que sustenta la vida vegetal y animal del planeta. El suelo constituye uno de los componentes fundamentales de los ecosistemas terrestres y conjuntamente con la biodiversidad y el clima, condicionan el equilibrio ecológico en un ámbito determinado. Durante mucho tiempo ha prevalecido la tendencia de considerar al suelo como un sustrato receptor de insumos para que las plantas que en él se cultivan proporcionen una buena cosecha. A pesar de que el suelo cumple la función de materia prima se debe tener en cuenta al suelo como un ente natural vivo cuyo funcionamiento depende de las funciones físicas, químicas y biológicas que cumplen la sostenibilidad de los ecosistemas. Pero, aunque el proceso natural de su formación toma varios años, un inadecuado manejo y la contaminación pueden deteriorarlo en menor tiempo del que se tomó formarlo. Para mantener la vida en el suelo las tres actividades más relevantes son: 1) alimentar con nutrientes a los microorganismos y macroorganismos; 2) suministrarles de humedad; y, 3) disminuir la cantidad de químicos que aplicamos al suelo, incluyendo los llamados no tóxicos [47,48].

El suelo es considerado como un cuerpo natural responsable de la vida, es un ente, porque tiene vida; tridimensional, porque es visto a lo largo, ancho y profundidad; trifásico, porque existe fase sólida, líquida y gaseosa; dinámico, porque dentro del suelo ocurren procesos que involucran cambios físicos y reacciones químicas constantemente. [49] En la actualidad, el desarrollo que está teniendo la agricultura ecológica con relación al suelo se basa en preservar y recuperar el suelo agrícola de los impactos negativos que han producido los métodos intensivos de producción y/o efectos climatológicos adversos sobre el medio ambiente que percute favorablemente en la seguridad alimentaria. Además, la posibilidad que tienen estos sistemas de producción permiten la diversificación de los ingresos, la potenciación de los recursos disponible y el empleo.[36]

Se debe indicar que el modelo intensivo de producción, no sólo ha provocado un deterioro del medio ambiente por la deforestación, destrucción de los suelos y la contaminación química de los suelos, el agua y, por tanto, de los alimentos que consumimos, sino que ha tenido fuertes repercusiones sobre la sociedad rural.[50] Además, mantener los suelos descubiertos y desprotegidos es un acto antinatural, que se paga con la erosión que en ellos se produce y, con la necesidad de aplicar nutrientes para la planta por la esterilización a que sometemos al suelo, perdiéndose

las funciones benéficas para la nutrición de las plantas que realiza el conjunto de organismos que habitan en un suelo vivo [51,52]. La alternativa es implementar sistemas agroecológicos que muestran la capacidad de adaptación a diferentes condiciones climáticas y especialmente a zonas desfavorecidas, permitiendo la autosuficiencia alimentaria en agricultores de bajos recursos con el uso de tecnologías de bajos insumos.[53]

2.5 Calidad de suelos

La explotación indiscriminada de los recursos naturales como consecuencia del incremento de la demanda de alimentos, cosechas, pastos, madera, etc., ha conducido a la degradación de los suelos la cual es una seria amenaza para el futuro de la humanidad. Así, la degradación medioambiental originada por el uso inadecuado del suelo ha originado desde la Conferencia de Las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo (UNCED) en Río de Janeiro, Brasil en 1992 una concientización pública acerca de la preservación de los recursos del suelo y el interés de dar a conocer un concepto de calidad que sea acogido por diferentes disciplinas como una herramienta para evaluar los efectos de los usos del suelo y la preservación de los recursos [28].

Desde la década de 1990 diferentes conceptos de calidad de suelos han ido evolucionando y mejorando a través de los años. Un suelo sano o de buena calidad es un suelo del que se pueden obtener cultivos, sanos y de alto rendimiento, con un mínimo de impactos negativos sobre el medio ambiente. Es un suelo que también brinda propiedades estables al crecimiento y salud de los cultivos haciendo frente a las condiciones variables de origen humano y natural [54].

La calidad del suelo es la capacidad o aptitud del suelo de soportar el crecimiento de vegetales sin que esto resulte en la degradación del suelo o en un daño ambiental [55]. La calidad de suelo consiste de componentes físicos, químicos y biológicos. La textura, profundidad efectiva, infiltración, capacidad retentiva del agua son los atributos físicos de la calidad del suelo. Los componentes químicos de la calidad del suelo incluyen carbono orgánico total, pH, capacidad de intercambio catiónico, conductividad eléctrica, nitrógeno, fósforo y potasio extractables. Los métodos más usados para medir atributos físicos y químicos de la calidad de suelo están bien establecidos y disponibles en la mayoría de laboratorios de suelo [56].

No obstante, la definición más completa y mundialmente aceptada “define la calidad como la capacidad del suelo para funcionar dentro de los límites de un ecosistema natural o manejado, sustentar la productividad de plantas y animales, mantener o

mejorar la calidad del aire y del agua, y sostener la salud humana y el hábitat”[57]. Los efectos adversos producidos por la actividad humana como el uso intensivo, el manejo inadecuado y/o efectos climáticos pueden generar el deterioro de un suelo que originalmente poseía buena calidad inherente generando erosión, reducción en la fertilidad, baja compactación, alta salinización y alta contaminación [58].

La calidad del suelo puede degradarse por efecto de procesos naturales (erosión hídrica, eólica, reducción de la MO del suelo, etc.), impacto negativo del uso intensivo de la agricultura, presión demográfica que provoca una disminución de los recursos, procesos crecientes de urbanización la cual genera un cambio de uso del suelo y actividades antropogénicas que contaminan los suelos con metales pesados, hidrocarburos pesticidas y plaguicidas.[59]

En los andes del Perú, la cantidad y distribución de lluvias tienen un impacto mucho más profundo en los rendimientos generando problemas de salinización, sequía o anegamiento del suelo. Dada tal variación en los rendimientos, no hay una conciencia por parte de los agricultores al no considerar la erosión de los suelos como una amenaza real para subsistencia. Al no tener en cuenta los efectos de la erosión, se está potencialmente perjudicando a los agricultores debido a que la relación entre la productividad y el suelo depende más de la calidad del suelo remanente en el terreno que la cantidad del suelo eliminado por la erosión [52,58]. Entonces, desde una perspectiva global, en la actualidad la mayor preocupación es conocer los factores limitantes y riesgos que restringen la capacidad de soporte de la tierra para el sustento de las plantas y por ende la población.

2.6 Indicadores de la calidad del suelo

Para evaluar los cambios en la calidad del suelo se debe contar con criterios universales, para ello es preciso contar con variables que puedan servir para evaluar la condición del suelo. Estas variables se conocen como indicadores, las cuales para el caso de suelo pueden ser propiedades físicas, químicas y biológicas o procesos que ocurren en él. La calidad del suelo no solo abarca un componente, por esto, para captar la naturaleza holística de la calidad deberán ser medidos todos los parámetros como salud o producción agrícola. Sin embargo, no todos los parámetros tienen la misma relevancia para todos los suelos o situaciones. Un grupo mínimo de propiedades del suelo, o indicadores, de cada uno de los tres componentes del suelo son seleccionados sobre la base de su aptitud para indicar la capacidad del suelo para funcionar en usos y climas determinados [9].

Para evaluar la calidad de los suelos en función a su uso como fuente de suministros de nutrientes se usa indicadores que permitan estimar la fertilidad del suelo. Para ello se seleccionarán determinados indicadores físicos y químicos que son utilizados en sistemas agrícolas y forestales [60].

Fertilidad de suelo

La fertilidad del suelo es la resultante de la interacción entre las características físicas, químicas y biológicas del mismo. Consiste en la capacidad para suministrar elementos esenciales en cantidades y proporciones adecuadas para el crecimiento y desarrollo de plantas específicas. Además, el suelo debe presentar mecanismos que aseguren contacto entre los elementos esenciales y las raíces [60,61].

2.6.1 Fertilidad física

Se refiere a las propiedades físicas que presenta un determinado suelo y que van a influir en el crecimiento normal de las plantas como son la textura, estructura, color, densidad aparente, porosidad y humedad.

a) Textura y estructura

Entre las propiedades físicas de los suelos más ampliamente utilizadas como indicadores de calidad se encuentran la textura y la estructura. La textura es la proporción de arena, limo y arcilla expresada en porcentaje teniendo en cuenta solo la fracción mineral del suelo < 2 mm de diámetro. De acuerdo a las distintas proporciones de arena (2 – 0,05 mm), limo (0,05 - 0,002 mm) y arcilla ($< 0,002$ mm) los suelos se agrupan en clases texturales [62,63]. Una clase textural es el nombre con que se designa a un suelo de acuerdo a la fracción o fracciones predominantes. El sistema USDA considera 12 clases texturales. Estas se pueden observar en el Triángulo Textural como se muestra en la Figura 2 [62,63].

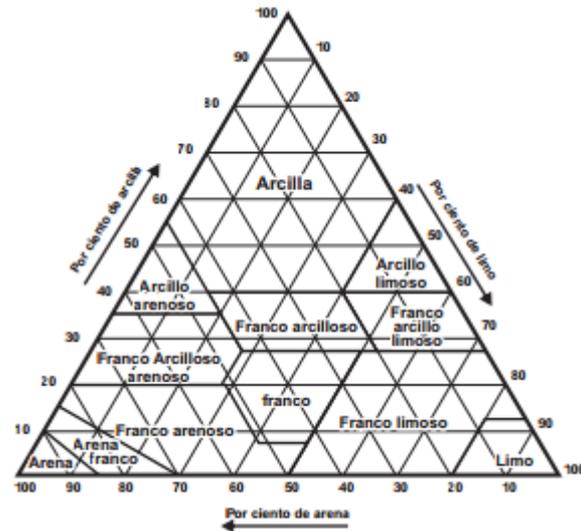


Figura 2: Clases texturales según la USDA [64].

La textura es un indicador de suma importancia ya que tiene influencia sobre la estructura, retención del agua, lavado, capacidad de cambio y reserva de nutrientes.[65]

La estructura es la manera como se ordenan las partículas de arena, limo y arcilla, para formar agregados. El factor cementante de los agregados del suelo lo constituyen la materia orgánica y la arcilla básicamente. Del mismo modo, el calcio favorece grandemente a la agregación, mientras que el sodio tiene un efecto dispersante.[62][63] Para describir la estructura se considera la forma del agregado, tamaño del agregado y grado o claridad del agregado como se muestra en la Tabla 4 y Tabla 5 [63].

Tabla 4: Descripción de la forma y tamaño de la estructura [9].

Tamaño o clase	Diámetro gránulos	Espesor láminas	Diámetro bloques	Altura de prismas
Muy fino	< 1 mm	< 1 mm	< 5 mm	< 10 mm
Fino	1 - 2 mm	1 - 2 mm	5 - 10 mm	10 - 20 mm
Medio	2 - 5 mm	2 - 5 mm	10 - 20 mm	20 - 50 mm
Grueso	5 - 10 mm	5 - 10 mm	20 - 50 mm	50 - 100 mm
Muy Grueso	> 10 mm	> 10 mm	> 50 mm	> 100 mm

Tabla 5: Descripción del grado de los agregados [9].

Sin estructura	Carente de agregación
Débil	Agregados escasamente visibles
Moderada	Agregados fácilmente observables
Fuerte	Agregados prominentes y visibles

b) Densidad aparente y porosidad total

La densidad aparente (DA) es definida como la relación entre la masa del suelo seco y el volumen global, que incluye el volumen de las partículas y el espacio poroso entre las partículas. La composición mineral es más o menos constante en la mayoría de suelos; se estima que la Densidad real varía entre 2,6 a 2,7 g/cm para todos los suelos. En tanto que la DA depende del grado de porosidad del suelo; es un valor más variable que depende además de la textura, el contenido de materia orgánica y la estructura [65]. Se puede asumir valores promedio para la densidad aparente de acuerdo a la textura como muestra en la Tabla 6.

Tabla 6: Relación entre densidad aparente y porcentaje de porosidad total en base a la textura del suelo [9].

Clase Textural	Densidad Aparente	% Porosidad
Arenoso	1.6 – 1.8	30 – 35
Franco. Arenoso	1.4 – 1.6	35 – 40
Franco	1.3 – 1.4	40 – 45
Franco. Limoso	1.2 – 1.3	45 – 50
Arcilloso	1.0 – 1.2	50 - 60

La porosidad es el porcentaje de espacios vacíos (o poros) con respecto del volumen total del suelo. A su vez, la porosidad incluye la macroporosidad (poros grandes donde se ubica el aire) y la microporosidad (poros pequeños o capilares donde se retiene el agua) [65]. La Tabla 7 muestra la distribución de diferentes poros en suelo de diferente textura.

Tabla 7: Relación de la distribución de poros y de la textura [9]

Suelo	Porosidad (% total)	Microporosidad (%)	Macroporosidad (%)
Arenoso	37	3	34
Franco	50	27	23
Arcilloso	53	44	9

c) Color del suelo

El color del suelo puede ser utilizado como una clave del contenido de ciertos minerales, basado en que los minerales férricos proveen la mayoría y la mayor variedad de pigmentos al suelo [66]. Para la determinación se compara con la tabla Munsell la cual describe todos los posibles colores en términos de tres coordenadas matiz (Hue) que mide la composición cromática de la luz que alcanza el ojo; claridad (Value), el cual indica la luminosidad u oscuridad de un color con relación a una escala de gris neutro; y pureza (Chroma), que indica el grado de saturación del gris neutro por el color del espectro [63].

d) Humedad en el suelo

El agua es de vital importancia para el crecimiento de las plantas, no solo porque estas necesitan de ellas para realizar sus procesos fisiológicos, sino porque también el agua contiene nutrientes en solución. Esta humedad es dinámica ya que se mueve constantemente de un lugar a otro en respuesta a las fuerzas de movimiento del agua determinadas por los factores meteorológicos y el uso de las plantas. Estas plantas deben gastar energía para extraer el agua del suelo; eso se debe a que el agua en el suelo está sometida a fuerzas que la retienen en los microporos capilares. Las fuerzas que retienen el agua en el suelo dependen de la textura y de la materia orgánica; las cuales permiten que el suelo pueda retener un volumen de agua disponible para las plantas [32,67].

2.6.2 Fertilidad química

La fertilidad química se refiere a la disponibilidad de los nutrientes, aquí interviene la capacidad del suelo para retener iones y la capacidad del ion a través de características ambientales para liberar iones [32].

Las estrategias que van unidas a la optimización de la fertilidad química están relacionadas con un adecuado grado de fertilidad física que permita un medio óptimo para que se den los múltiples mecanismos de la dinámica de los ciclos de nutrientes, un adecuado intercambio de oxígeno y agua, una adecuada reserva orgánica y una

actividad biológica capaz de activar los procesos de biodegradación y la biodisponibilidad de nutrientes [32,61].

a) pH del suelo

El pH del suelo tiene una influencia indirecta en los procesos químicos, disponibilidad de nutrientes, procesos biológicos y la actividad microbiana. Normalmente, el rango de pH de los suelos varía entre 3,5 a 9, la razón por la que no alcanza valores extremos de 0 o 14 se debe a que la solución suelo no es una solución verdadera sino que constituye una solución coloidal [68].

En cuanto a la disponibilidad de nutrientes para las plantas, a un pH alcalino la disponibilidad de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg, y S) y del molibdeno es mayor ; mientras que, a pH ácido es mayor disponibilidad de micronutrientes (Fe, Mn, Zn, Cu y B), excepto el molibdeno como se muestra en la Figura 3 [68].

A la mayoría de los cultivos les favorece rangos de pH de 5 a 7,5. Sin embargo, cada especie se acoge o desarrolla mejor dentro de un determinado rango como se muestra en la Figura 4 [68].

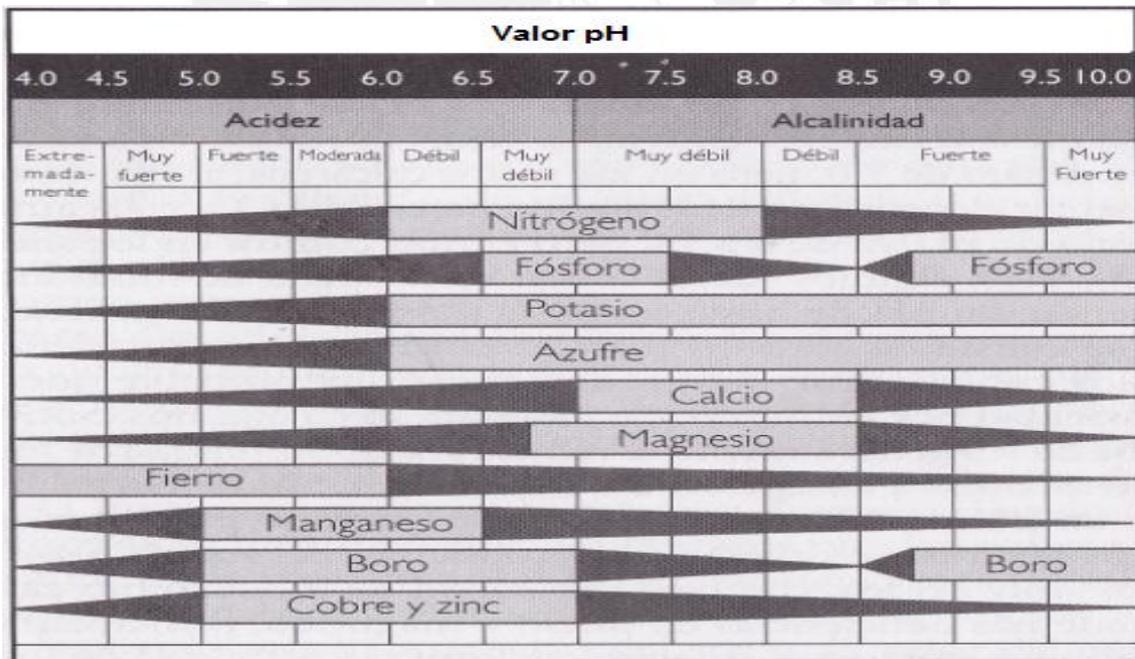


Figura 3: Influencia del pH del suelo sobre la asimilación de los nutrimentos[67].

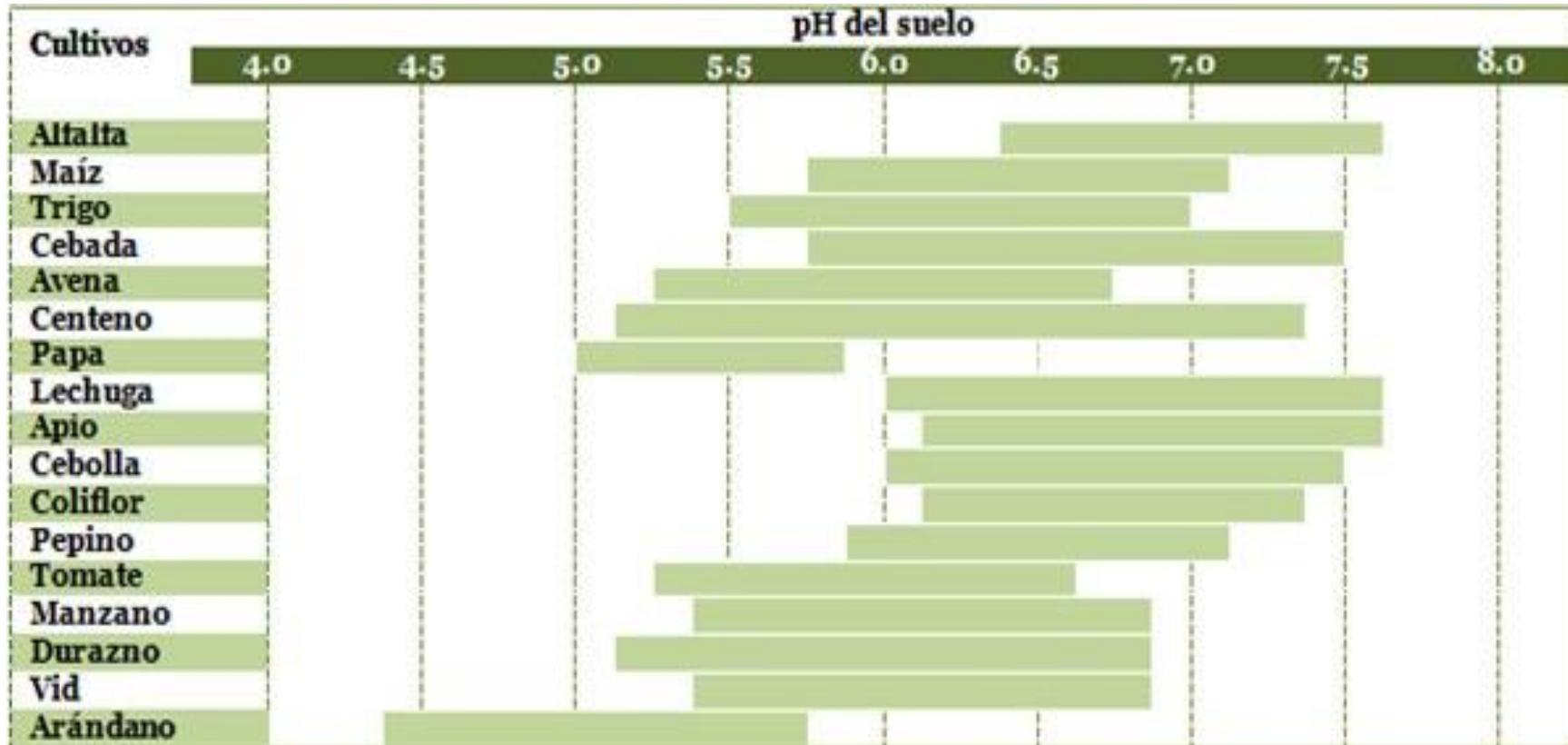


Figura 4: Rangos de pH apropiado para determinados cultivos [67].

b) Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica (CE) de una suspensión suelo-agua indica la cantidad de sales presentes en el suelo. Todos los suelos contienen algo de sales, las cuales son esenciales para el crecimiento de las plantas. Sin embargo, un exceso de sales inhibe el crecimiento de las plantas al afectar el equilibrio suelo-agua. Define la actividad vegetal y microbiana, estima la salinización de los suelos y el grado de erosión. [9] Los iones generalmente asociados con salinidad son los cationes Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ y H^+ . Entre los aniones están los iones NO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , HCO_3^- y OH^- [67].

En general, los valores de la CE para extractos 1:1 entre 0 – 0,8 dS/m son aceptables para el crecimiento de los cultivos. No obstante, para sitios específicos depende del uso específico de las tierras y de la tolerancia de los cultivos [61]. Además estudios de correlación muestran que la CE en pasta saturada es aproximadamente el doble que la CE en extracto 1:1 [69]. La Tabla 8 muestra la clase de salinidad del suelo y la respuesta general de los cultivos y microbiana para cada clase en una pasta saturada.

Tabla 8: Tabla Salinidad del suelo [62].

C.E.(mmhos/ cm o dSm ⁻¹)	Significado Agronómico
< 2,0	Efectos de la salinidad casi nulos
2 a 4	Los rendimientos de los cultivos más sensibles pueden ser restringidos.
4 a 8	Se reducen los rendimientos de muchos cultivos.
8 al 16	Sólo los cultivos tolerantes rinden satisfactoriamente.
>16	Solo unos cuantos cultivos muy tolerantes rendirán satisfactoriamente.

c) Materia orgánica

La materia orgánica está constituida por los compuestos de origen biológico que se encuentran en el suelo. Por otro lado, el humus está compuesto de restos *post mortem* de vegetales y descomposición, transformación y resíntesis [32]. Desempeña un rol muy importante en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo ya que aumenta la capacidad de intercambio catiónico, regula el pH, retiene la humedad y contribuye con la estabilidad de suelos al ayudar a aglutinar las partículas para formar agregados [32]. Además, a nivel nutricional tiene capacidad de retener una gran proporción de nutrientes, cationes y oligoelementos esenciales para el crecimiento de las plantas y, regulan el pH del suelo [70].

Se reconoce globalmente que el carbono orgánico en el suelo sea un factor fundamental para la salud del suelo, forma parte fundamental del ciclo de carbono y tiene gran importancia en la mitigación a los efectos del cambio climático [70]. Además la relación C/N en el suelo es un índice para la caracterización de materia orgánica, mientras más alta sea su valor habrá problemas de disponibilidad de nitrógeno en el suelo.[71]

d) Capacidad de intercambio catiónico

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) es definida como la suma total de los cationes intercambiables que un suelo pueda adsorber. Se expresa en términos de moles de carga positiva absorbida por unidad de masa. Su unidad de medida en el Sistema Internacional (SI) es centimoles de carga positiva por kilogramo de suelo (cmol (+).kg^{-1}) de suelo; sin embargo, en la actualidad todavía se utiliza la expresión miliequivalentes por 100 g de suelo ($\text{me}/100\text{g}$) [67].

La CIC es importante dentro del potencial nutricional del suelo porque almacena nutrientes para las plantas Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} , etc., y posteriormente los libera de forma paulatina. Estos nutrientes en forma iónica son retenidos con diferentes fuerzas que dependen del coloide inorgánico, textura, materia orgánica, pH y de las características del ion, como se muestra en la Tabla 9 y Tabla 10. Además interviene en los procesos de floculación-dispersión de las arcillas y, por consiguiente, en el desarrollo de la estructura y en la estabilidad de los agregados [70].

Tabla 9: Relaciones entre tipo de coloide y CIC [68].

Tipo de coloide (arcillas y humus)	CIC meq/100g
1:1 Caolinita	3 – 15
Haloisita	5 – 10
2:1 Montmorillonita	80 – 120
Vermiculita	100 – 150
Ilita	20 – 50
2:2 Clorita	10 – 40
Humus	100 – 300
Sesquióxidos	< 3

Tabla 10: Relaciones entre textura del suelo y la CIC [68].

Textura	CIC (meq/100g)
Rango Aproximado	
Arenas	<5
Franco-arenoso finos	5 – 10
Franco y franco-limosos	5 – 15
Franco arcillosos	15 – 25
Arcillas	>25

e) Nutrientes

Los nutrientes son sustancias necesarias para que las plantas lleven a cabo su metabolismo y, en consecuencia, se desarrollen y crezcan. La cantidad de nutrientes presente en el suelo determina su potencial para alimentar organismos vivos [72]. Los dieciséis nutrientes esenciales para el desarrollo y crecimiento de las plantas se suelen clasificar entre macronutrientes y micronutrientes dependiendo de su requerimiento para el desarrollo de las plantas [72].

En la nutrición de las plantas no deben faltar ninguno de los macroelementos primarios ni secundarios así como microelementos esenciales y deben estar presentes en la proporción adecuada. Los macronutrientes primarios son consumidos por las plantas en grandes cantidades, mientras que los macronutrientes secundarios son tomados en cantidades menores que los anteriores. Todos ellos tienen sus funciones. Son necesarios en la alimentación de la planta. La deficiencia de cualquiera de ellos ocasiona carencias que afectan de distinta manera al estado general de la planta, dependiendo del nutriente que falte y del grado de carencia [72].

Los indicadores más usados para la evaluación de la fertilidad son los macronutrientes nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S). Pero, para determinados tipos de suelos que presentan déficit en micronutrientes o cuando en la zona de estudio no hay registros de caracterización de los suelos es indispensable la selección de los micronutrientes ya que su insuficiencia puede dar lugar a carencia y su exceso a toxicidad, es el caso del hierro (Fe), cinc (Zn), manganeso (Mn), boro (B), cobre (Cu), molibdeno (Mo), cloro (Cl).

2.7 Descripción del área de estudio**2.7.1 Centro poblado de Cakra**

El centro poblado (CC.PP.) de Cakra presenta una accidentada topografía donde los antiguos pobladores han sabido acondicionar el terreno para el desarrollo de la agricultura. En las partes altas presenta el manantial de Llutana y la laguna de Yanacocha, y en la parte baja el río Paluche y el río Cakra son los que dan vida a este

pueblo. Sus cultivos en temporada de altas precipitaciones son abundantes y en épocas de sequía hay crisis de subsistencia [73].

El centro poblado de Caca está situado en la falda de un cerro a 2800 m s.n.m perteneciente a la cordillera occidental de los Andes con valles profundos que bajan hasta llegar al río Paluche, en ellos existen andenes y grandes terrenos de cultivos muchos de ellos abandonados y en otros casos en estado de uso realizando cultivos de frutales, alfalfares y productos agropecuario, etc. [73].

2.7.1.1 Aspectos geográficos

El CC.PP. Caca se encuentra ubicado en la parte sudeste del distrito de Caca, en la zona sur-chico de la provincia de Yauyos, en la región Lima a 2800 m s.n.m, con coordenadas UTM (UTM WGS84) norte 8583512 y este 415038 como se muestra en la Figura 5. El pueblo se encuentra una distancia de 65 kilómetros de la capital de la provincia de Yauyos. [73,74] El distrito de Caca tiene una extensión superficial de 213,79 km², limita con los siguientes distritos: por el norte con el distrito de Tupe, por el sur con el distrito de Hongos y Lincha, por el este con el distrito de Tupe y la región Huancavelica y por el oeste con el distrito de Vínac y Catahuasí [74].

2.7.1.1 Aspectos meteorológicos

Para ver las variables meteorológicas, importante en la formación del suelo, se utiliza la información de la estación meteorológica Yauyos (2010) que está ubicada cerca al distrito de Caca a 2290 ms.n.m [76]. La ubicación de la estación meteorológica Yauyos se muestra en la Figura 6. El clima del distrito de Caca es semiárido mesotermal.[77]

Tabla 11: Ubicación de la estación meteorológica.

Estación Meteorológica	Descripción	Coordenadas		Altitud (ms.n.m)
		WGS 84-Zona 18S		
		Este	Norte	
Yauyos	Clasificado dentro de la categoría de estación climatológica ordinaria (CO)	490112	8628291	2 290

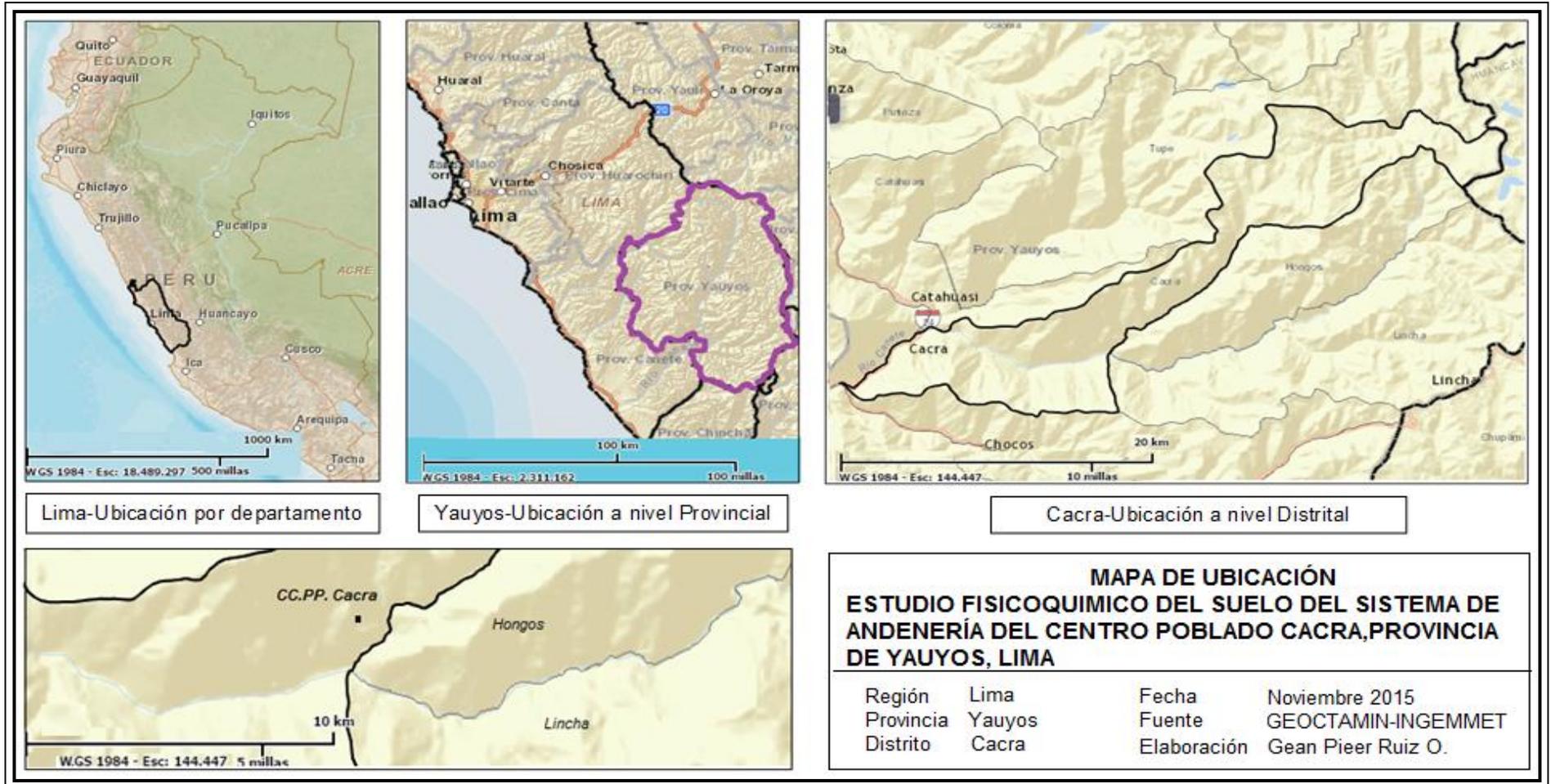


Figura 5: Ubicación del CC.PP. Caca a nivel departamental, provincial y distrital [75]

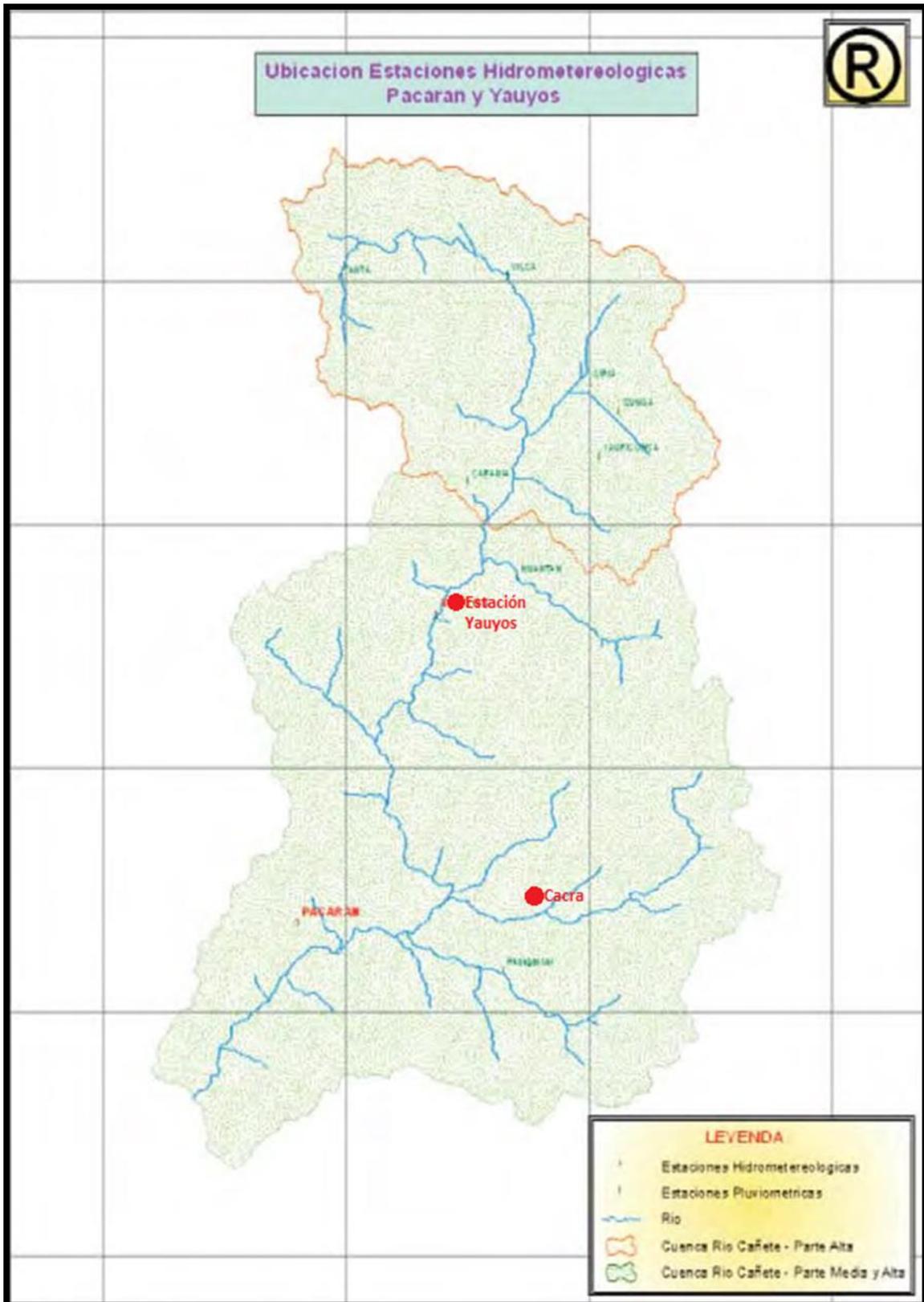


Figura 6: Ubicación de la estación meteorológica Yauyos. Mapa geológico [76].

a) Temperatura

Este parámetro es registrado en la estación meteorológica de Yauyos como se muestra en la Figura 7 [76].

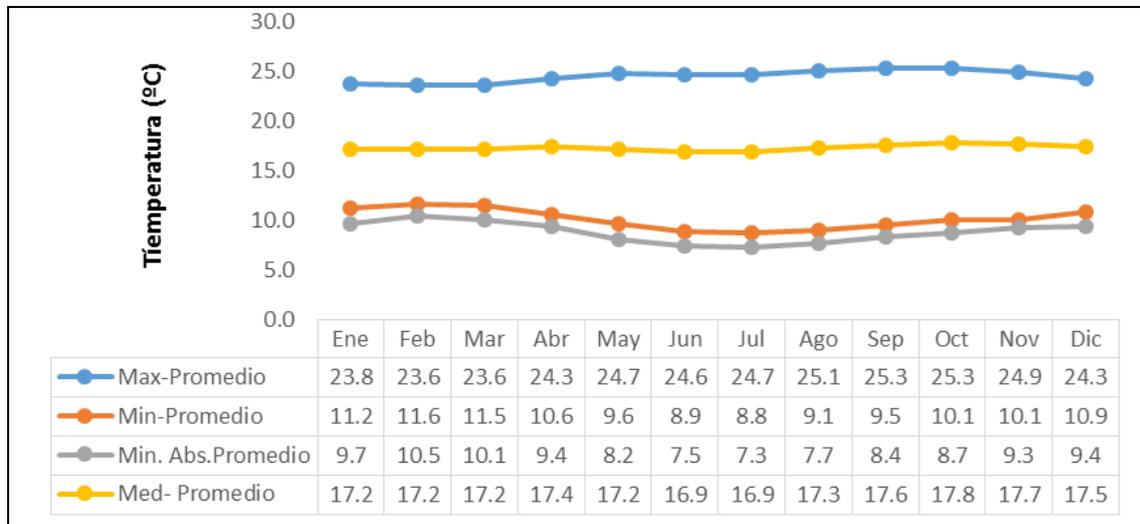


Figura 7: Promedio anual de temperatura- Yauyos [76].

b) Precipitación

Este parámetro es registrado en la estación Yauyos a través del uso de pluviómetro. Los datos mostrados en la Figura 8 muestran una variabilidad de precipitación total mensual a lo largo del año muy diferente a la temperatura; es decir, entre los meses de octubre - abril se dan las máximas concentraciones con valores hasta de 23 mm y, las mínimas precipitaciones se dieron en los meses de mayo - setiembre con valores de 0,1 y 0,0 respectivamente. El promedio anual es 7,4 mm [76].

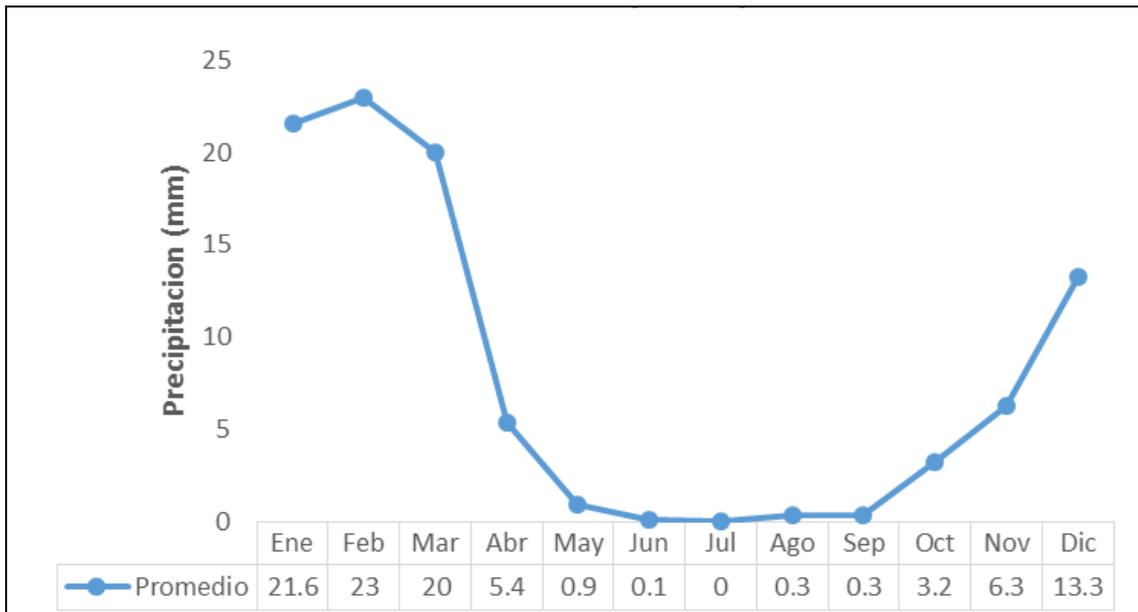


Figura 8: Promedio anual de precipitación – Yauyos [76].

c) Humedad relativa

El valor máximo registrado en la estación corresponde a los meses de febrero y marzo (coincidentemente con el periodo anual lluvioso) con 87,0% y una menor humedad relativa del 78,7% en el mes de junio como se muestra en la Figura 9 [76].

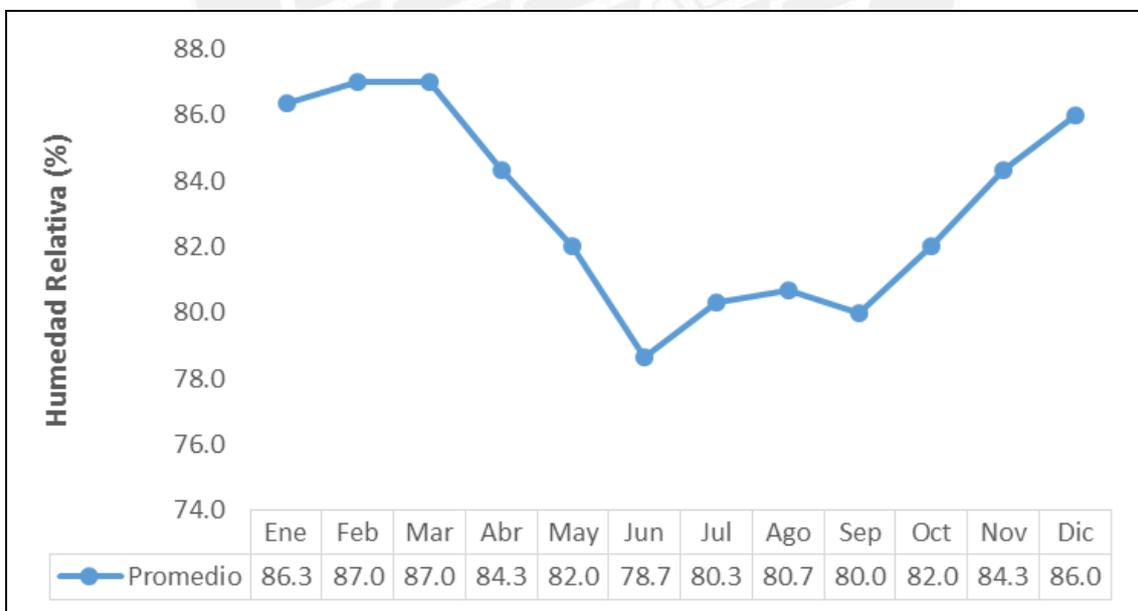


Figura 9: Promedio anual de humedad relativa – Yauyos [76].

d) Velocidad del viento

La velocidad de viento para un año promedio presenta valores de 1,7 m/s. La velocidad del viento varía de 1,4 a 1,9 m/s, los registros máximos de viento se dan en octubre a noviembre y los registros mínimos de viento se dan en febrero a marzo como se muestra en la Figura 10 [76].

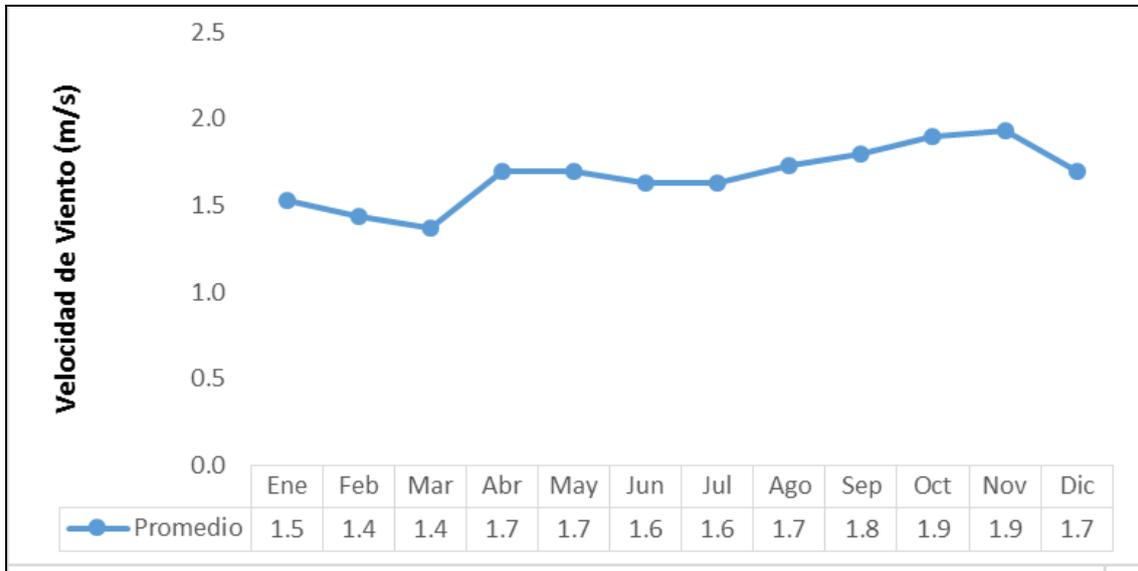


Figura 10: Promedio anual de velocidad del viento – Yauyos [76].

e) Dirección del viento

En el periodo de verano el viento predominante es del suroeste (SW) con frecuencias entre 44% a 55%. Frecuencias inferiores en la dirección del viento ocurren del oeste (WSW, WNW, SSW). La velocidad del aire varía entre 1,3 m/s a 2,5 m/s como se muestra en la Figura 11 [76].

En invierno, el viento predominante es del sudoeste (SW) con frecuencias similares a las del verano. Otras direcciones frecuentes son sur (S) y oeste (W). Las velocidades del viento que se registran en este periodo varían entre 1,7 a 4,2 m/s. La dirección predominante sudoeste (SW) como se muestra en la Figura 12 [76].

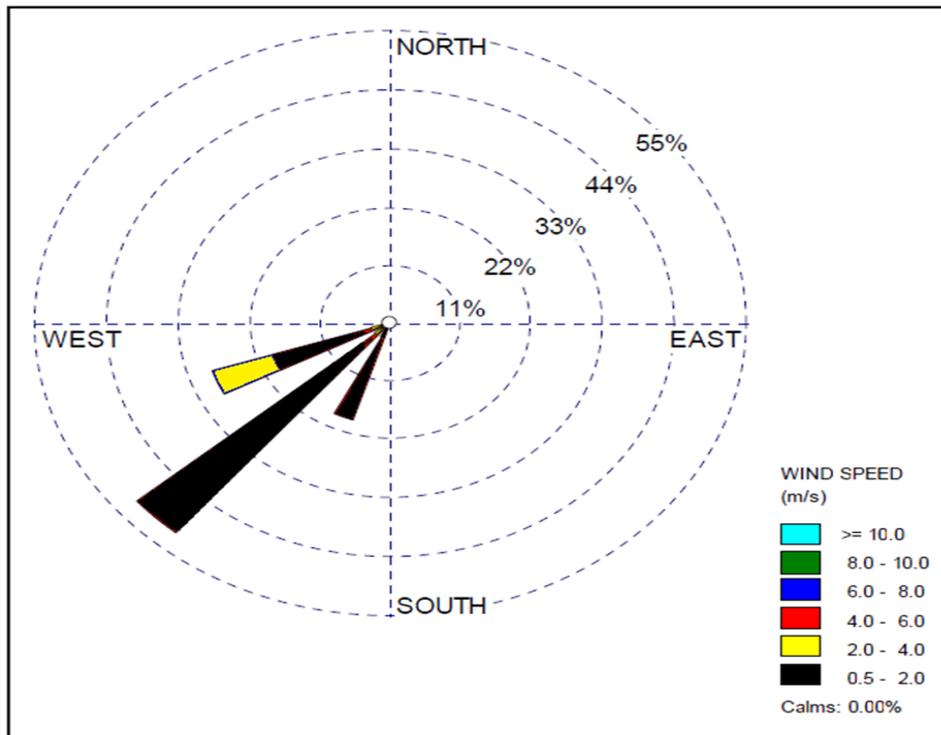


Figura 11: Rosa de vientos para un año normal – Estación de verano [76].

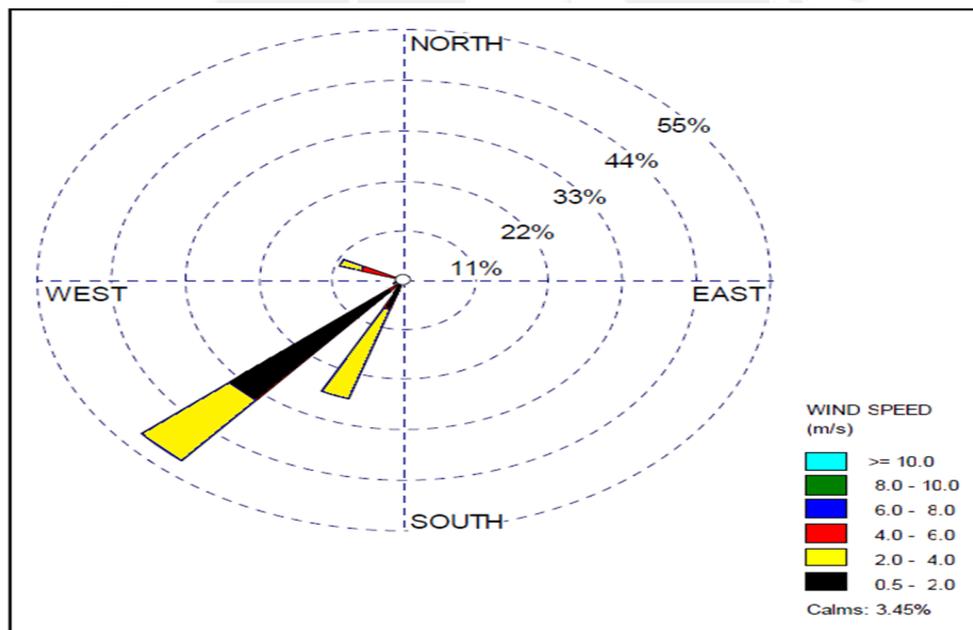


Figura 12: Rosa de vientos para un año normal – Estación de invierno [76].

f) Horas del Sol

Para el presente estudio se ha tomado el registro de las horas de sol de la estación meteorológica de Yauyos, que muestra valores más altos entre los meses de agosto a

septiembre con un valor de 6,9 y valores menores de 3,5 en el mes de febrero mostrados en la Figura 13 [76].

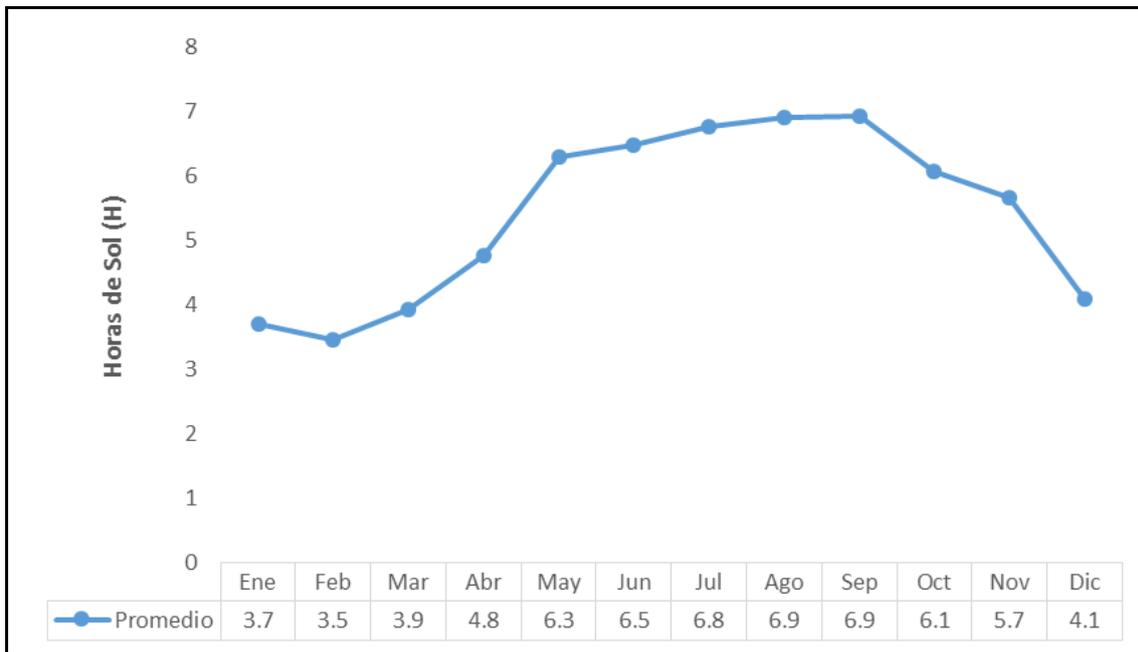


Figura 13: Promedio anual de horas de sol – Yauyos [76].

2.7.1.2 Aspectos geológicos

Se utilizaron las cartas nacionales, levantadas por el IGN, a escala 1:100 000. Los datos cartográficos sirven como referencia en la elaboración de los mapas geológicos en el centro poblado de Caca. Las cartas nacionales utilizadas en el estudio han sido las correspondientes a los cuadrángulos 26-I llamado el cuadrante de Tupe mostrados en la Figura 14 [78].

a) Geomorfología

El área está ubicada en las estribaciones de la cordillera occidental, razón por la cual presenta un relieve accidentado en el que contrastan cumbres con valles angostos y profundos de laderas con fuertes pendientes [75]. De acuerdo al mapa geológico, el área de estudio está representada en su borde occidental por las estribaciones del batolito cordillerano que comprende rocas intrusivas [75].

b) Estratigrafía

Predominan las rocas intrusivas, la unidad Tupe consiste de un plutón de granodiorita de grano medio con gradaciones a tonalitas (PN T-tu/gdto), que se formaron en la era cenozoica y periodo paleógeno-neógeno [79].

En el tipo de roca granodiorita se encuentran minerales esenciales de feldespato potásico (KAlSi_3O_8), cuarzo (SiO_2), feldespato plagioclasas alcalina ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), mica biotita (aluminosilicatos de potasio, magnesio y hierro) y anfíbol (silicato de calcio, magnesio, hierro y aluminio, con iones hidroxilo). Y en la roca tonalita se encuentra feldespato potásico, cuarzo, feldespato plagioclasas intermedia, mica biotita y anfíbol [80].

2.7.1.1 Aspecto histórico

Etimológicamente la palabra Caca proviene del idioma Jagura que significa “Qaqa”=Peña” Debido a que dicho distrito está rodeado de peñas, de aproximadamente de 100 a 200 metros de altura [73]. Caca es uno de los pueblos más antiguos de esta parte del país porque hasta allí llegaron las chancas en su periodo de conquista, sometiendo al imperio incaico que antes fue habitado por los tupis. Antiguamente hablaban el idioma Juqaru que fue cambiando al idioma Quechua, traído por los diferentes pueblos de Ayacucho, Huancavelica y Junín [73].

El origen del pueblo pasó por tres etapas. En la época preinca se desarrolló en Malcahuasi, donde resaltan sus rudimentarias cerámicas y ruinas [74]. En la época incaica sus pobladores habitaron las partes altas del pueblo donde se construyeron las ruinas de Purunhuasi, las chulpas Chumpicasha, huacos policromados, piedras labradas, los andenes de Shihuitay, Antuco, Purunhuasi y el canal de riego empedrado [74]. En la época virreinal se construyó la iglesia colonial San Pedro de Caca, los reservorios y los canales de riego, utilizando el adobe para edificar sus casas sobre la base de piedra, con techos de paja y otros de teja. Durante la conquista y el coloniaje español, los antiguos cacareños son obligados por los españoles a trasladarse a zonas más bajas, hoy Centro Poblado de Caca. Luego, los pobladores de Caca se preocuparon en su independencia y crearon el distrito de San Pedro de Caca durante el gobierno de Oscar R. Benavides el 15 de julio de 1936 con la Ley Nro. 8427 [73].

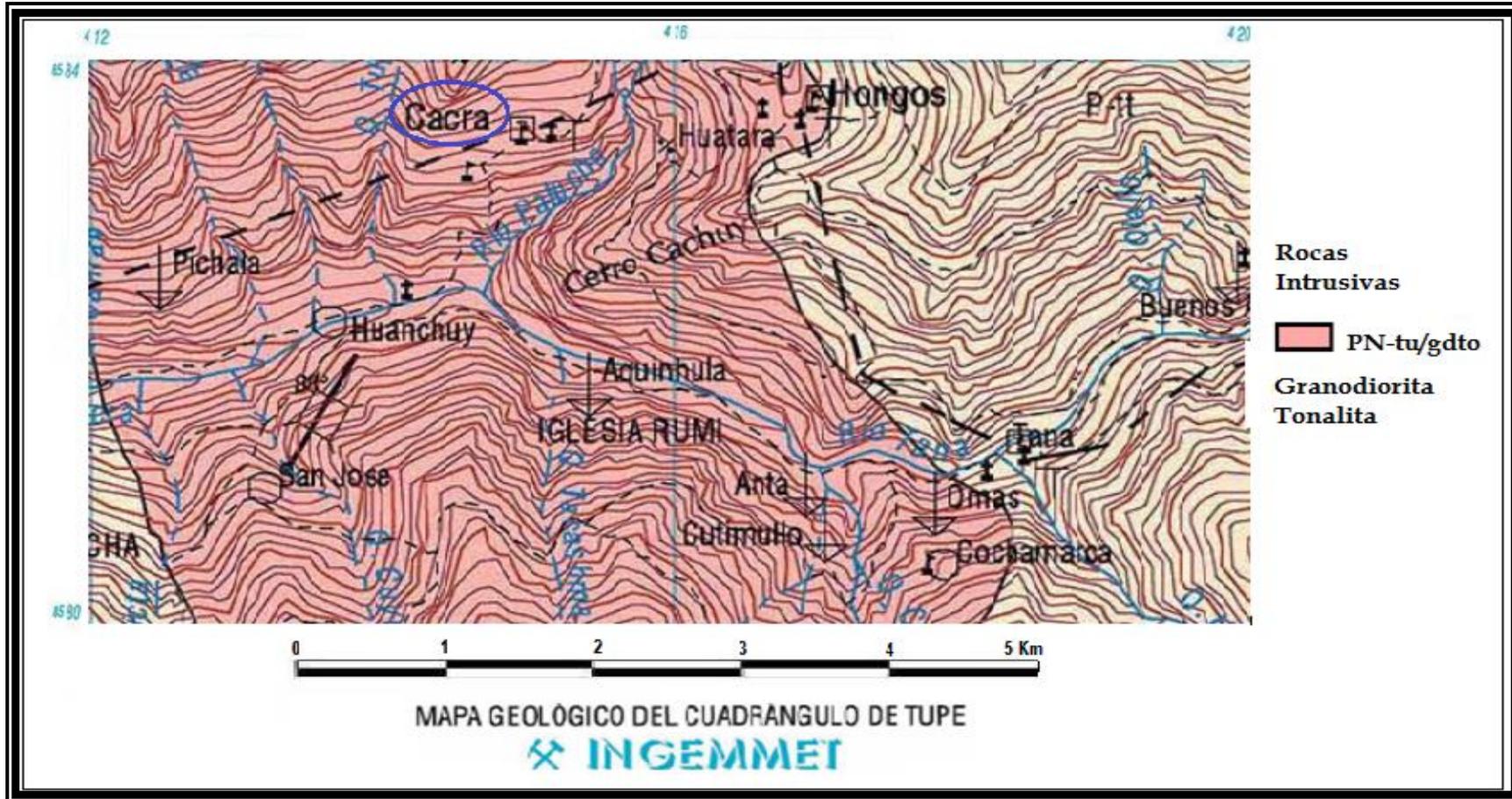


Figura 14: Mapa geológico del CC.PP. Cakra [78]

2.7.1.2 Aspecto político

La comunidad campesina de Caca se organiza bajo el régimen del alcalde Edison Luben Sulca Molleda y su junta directiva conformada por el presidente de la comunidad (Donato Julian Portas Molleda), vicepresidente (Fidel Aristeres Paucar Poma), secretario (Elmer Gustavo Roman Barboza), tesorero (Víctor Armando Portas Barboza) y demás autoridades [73].

2.7.1.3 Aspecto demográfico

El distrito de Caca tiene una población de 591 habitantes según el último censo realizado en el 2009 por el INEI con colaboración de UNFPA (Fondo de Población de las Naciones Unidas). Como se muestra en la Figura 15 el distrito cuenta con una alta tasa poblacional de menores de 14 años y el 99% presentan viviendas particulares [24].

Es un distrito que tiene un índice de pobreza, desnutrición y analfabetismo elevado, siendo calificada como pobre, posee una tasa de desnutrición para niños de 6-9 años del 20-35% y, para niños de 5 años a más, posee una tasa de alfabetismo del 21-36% según los mapas temáticos realizados por el gobierno regional de Lima [23].

El 41,0% de la población es pobre del cual 16,2% vive en extrema pobreza según el último mapa de pobreza provincial y distrital del 2009 [81].

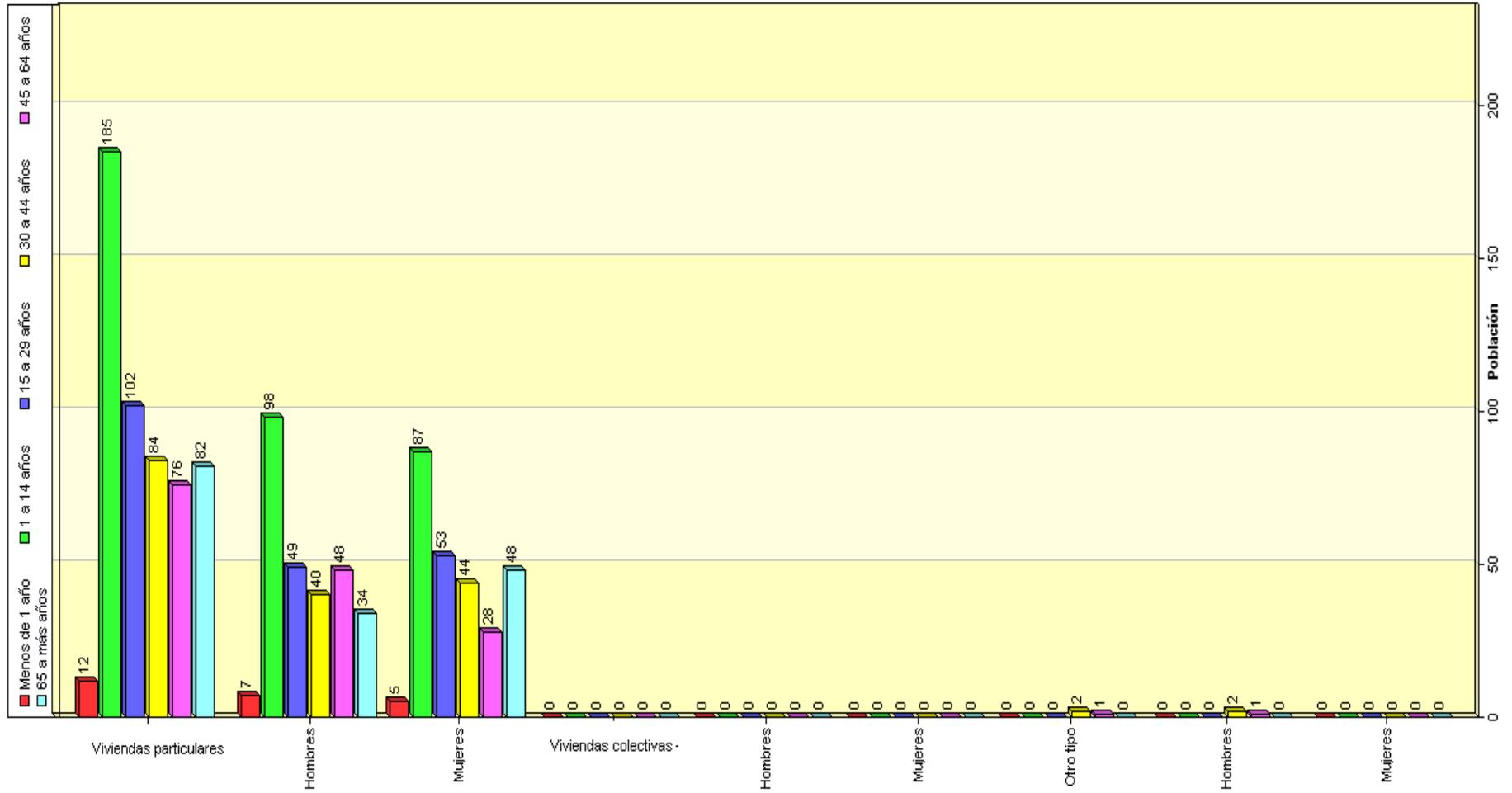


Figura 15: Población total por grupos de edad [81].

2.7.1.4 Aspecto económico

El distrito de Caca tiene una población económicamente activa de 228 habitantes y su actividad principal está en el sector agropecuario como se muestra en la Figura 16 y Tabla 12, respectivamente [24].

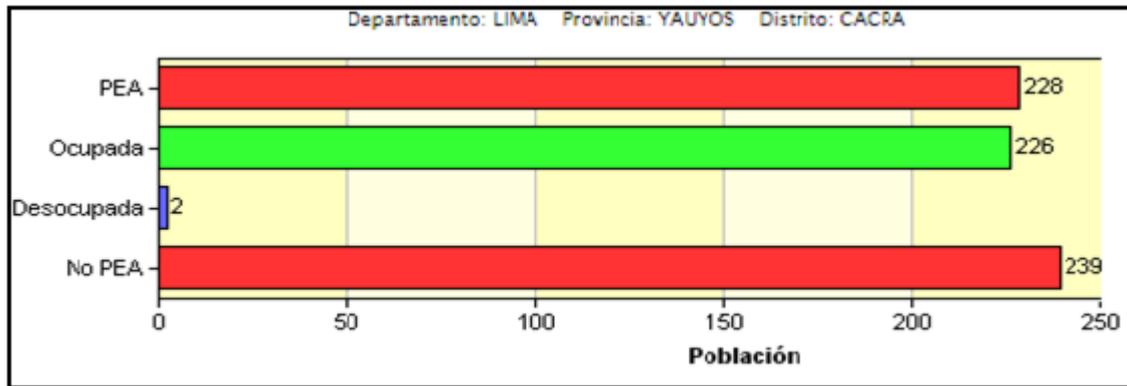


Figura 16: Población por condición de actividad económica [82].

Tabla 12: Población económicamente activa por grupos de edad y rama de actividad económica [82].

actividad económica	Total	6 a 14 años	15 a 29 años	30 a 44 años	45 a 64 años	65 y más años
Distrito Caca	228	8	56	57	62	45
Agricultura y ganadería	177	7	42	34	51	43
Industrias manufactureras	6	1	3	1	1	0
Suministro de agua y luz	6	0	1	4	1	0
Construcción	10	0	1	5	4	0
Otros	29	0	9	13	5	2

Las actividades agropecuarias son fuentes principales de trabajo sobre la que gira la economía del distrito de Caca. En las partes bajas casi todo el suelo de Caca es fértil, sus cerros llenos de pastos naturales favorece a la ganadería. Dichos terrenos lo hacen óptimos para los más variados cultivos, pero los más preponderantes son: el cultivo de la papa, maíz y el trigo. Además, cultivan la alfalfa que sirve como alimento para los animales del lugar [73].

La agricultura en la zonas altas del distrito es de desarrollo limitado y de alto riesgo por las variaciones climáticas propias de cada piso ecológico, ya que esta se realiza principalmente entre los 2800 m s.n.m. a 3200 m s.n.m., mayormente en laderas moderadamente empinadas, andenes derruidos y en algunos casos terrenos planos por falta de manejo de conservación de los suelos [73].

Los productos agrícolas en las partes más bajas del distrito son el maíz, el trigo, la cebada, la papa, la calabaza, el frijol y en las partes altas cultivan la papa de color, la oca, la mashua, el olluco. Además cultivan plantas frutales como manzana, granadilla, duraznos, paltas, plátanos, etc. [73].

La producción ganadera del distrito, cuenta con granjas de ganado ovino, vacuno, porcino, caprino, caballar y aves [73].

El CC. PP. de Caca cuentan con una importante zona de reserva hídrica como el manantial de Llutana que es usado por los habitantes para el riego de algunos andenes. A pesar de ello es muy poca el área cultivada que cuenta con riego. Esto se debe a las bajas precipitaciones y la falta de infraestructura de canales donde son transportadas el agua a partir del manantial, la mayor parte de los cultivos se siembran en seco. Por ello en estas zonas se necesita canalizar urgentemente para hacer un uso eficiente del recurso hídrico y así recuperar plantaciones y árboles frutales [73].

Actualmente, el centro poblado intenta convertirse en un importante centro de desarrollo económico con la producción de frutas de calidad para que se pueda comercializar en los mercados de las provincias de Cañete, Ayacucho y la misma capital; entre los frutales que se producen están los albaricoques, duraznos, maracuyá, chirimoya y paltas. Aún no se conoce resultados eficientes ya que no se cuenta con registros de productividad por falta de políticas de gestión en el manejo de los suelos.

2.7.2 Sistema de Andenería en el CC.PP. Caca

Los sistemas de andenerías en el CC. PP. Caca lograron conseguir mayores áreas de cultivos, para eso los antiguos pobladores tuvieron que domesticar abruptas pendientes de los andes. Es decir, cultivar en los andes significó convertir el territorio montañoso en áreas adecuadas para la agricultura. Esto implicó el manejo de las aguas por medio de canales y el establecimiento de lugares planos por medio de andenes de cultivos realizando varias actividades. La primera tarea consistió en despejar las laderas del río o cercanas a lagunas de alturas donde se instalaría el sistema de andenería. Luego, por la cota superior del terreno se construyen canales

que traerían agua desde un punto más alto del manantial o lagunas de altura (los antiguos peruanos abastecían sus cultivos con agua de las partes altas de la cuenca). Finalmente, desde el canal hacia abajo se comenzaba la construcción de terrazas reforzadas con muros de piedra que consistían de rellenos con distintos tipos de sedimentos para asegurar su adecuado funcionamiento, agregándose en muchos casos restos orgánicos para mejorar la fertilidad de la tierra [83]. Los espacios dejados entre las terrazas sirven como canales verticales que tomaban agua desde el canal superior. Mientras el agua bajaba se controlaba su flujo para asegurar que cada terraza tuviera la cantidad adecuada de agua para regar el cultivo [83].



3 METODOLOGÍA

Para evaluar los indicadores fisicoquímicos de fertilidad del suelo se usa la metodología aplicada por la química y las ciencias del suelo que combinan métodos descriptivos, analíticos y cartográficos incluyendo el muestreo en campo y análisis en el laboratorio siguiendo metodologías químicas estandarizadas. Para el esquema metodológico de la investigación se siguen cuatro etapas. La primera es de inspección preliminar, la segunda es el trabajo de campo, la tercera etapa es el trabajo de laboratorio y, finalmente, la etapa de gabinete como se muestra en la Figura 17.

3.1 Metodología de muestreo

3.1.1 Frecuencia de muestreo

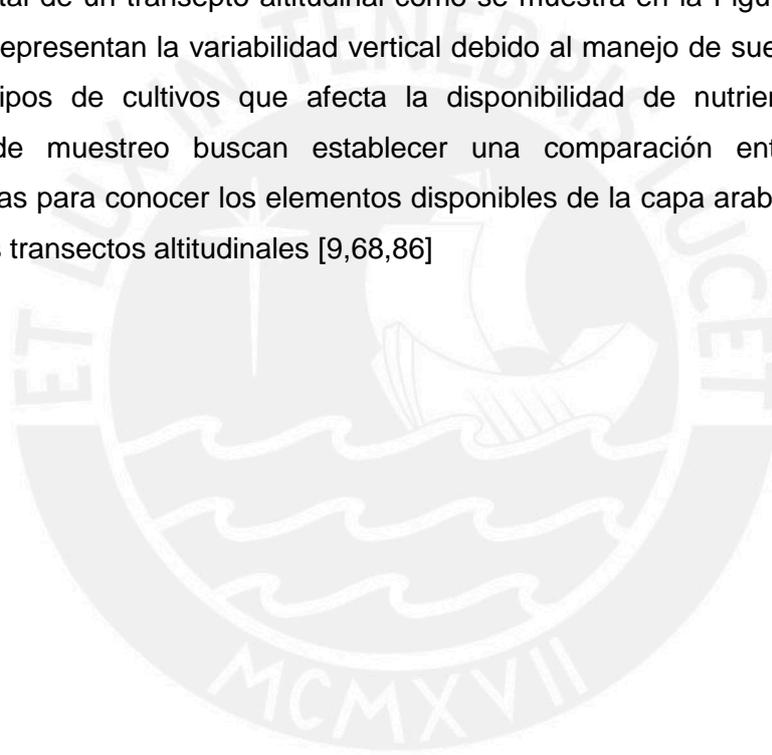
Para evaluar los indicadores que determinaron la fertilidad de suelos se trabajó en dos momentos debido a la variabilidad temporal; el primer periodo se realizó el 24 de mayo del 2015 en la época de sembrío y, el segundo periodo se realizó 19 de julio del 2015 en la época de cosecha de leguminosas, gramíneas y frutales para evaluar la variación de concentración de los nutrientes en el tiempo debido a su transporte y su disponibilidad para ser absorbidos por la zona radicular de determinados cultivos en la zona de estudio. Estas frecuencias estuvieron relacionadas con las influencias estacionales sobre la composición química del suelo, sobre todo en lo relativo a la humedad ya que esto afecta a la acumulación o el lavado de sales, el pH y los elementos intercambiables. Estos periodos coinciden con el periodo de mayor (febrero) y menor precipitación de lluvias (julio) [68,84]. Sin embargo, el periodo de mayor precipitación se realizó en mayo debido a la caída de huaycos que bloqueaba la carretera hasta la zona de estudio.

3.1.2 Estaciones de muestreo

Para la información de la cantidad y disponibilidad de los nutrientes en el sistema de andenería perteneciente al CC.PP. Caca, en el distrito del mismo nombre, ubicado en la margen izquierda de la parte alta de la microcuenca del río Caca, que cuenta con aproximadamente 40 ha de cultivos (400 000 m²), se realizó un perfil horizontal y vertical del suelo tomando muestras representativas en la zona de estudio. Para la ubicación de las estaciones de muestreo en la zona de estudio se tomaron en cuenta el manejo de los cultivos, las curvas de nivel a diferentes cotas altitudinales, el estado de conservación de los andenes y las condiciones climáticas (temperatura, radiación solar, tiempo de exposición solar, dirección de los vientos). Para ello se usó en la etapa preliminar o de gabinete el programa Google Earth para georreferenciar según

las coordenadas UTM-WGS84, delimitando 9 estaciones para la toma de muestras como se muestra en la Figura 18 [68].

Para ubicar las delimitaciones de las unidades homogéneas sobre el área total de potencial interés se delimitaron las zonas a partir de un patrón de muestreo de rejillas regulares y se colectaron 9 muestras superficiales de 30 cm de profundidad recomendado para un muestreo con fines de fertilidad mostrada en la Tabla 13 [85]. En esta profundidad de la capa superficial o arable del suelo se da la absorción de los nutrientes por las raíces de los cultivos. En cada zona se trazó un transecto de arriba hacia abajo en la gradiente altitudinal y se tomaron 3 unidades que representan las zonas bajas, medias y altas del andén cuyos puntos corresponden al 30, 60 y 90% de la longitud total de un transecto altitudinal como se muestra en la Figura 18.[84] Los tres perfiles representan la variabilidad vertical debido al manejo de suelos, estado de andenes y tipos de cultivos que afecta la disponibilidad de nutrientes [68]. Las estaciones de muestreo buscan establecer una comparación entre las zonas representativas para conocer los elementos disponibles de la capa arable del suelo en los diferentes transectos altitudinales [9,68,86]



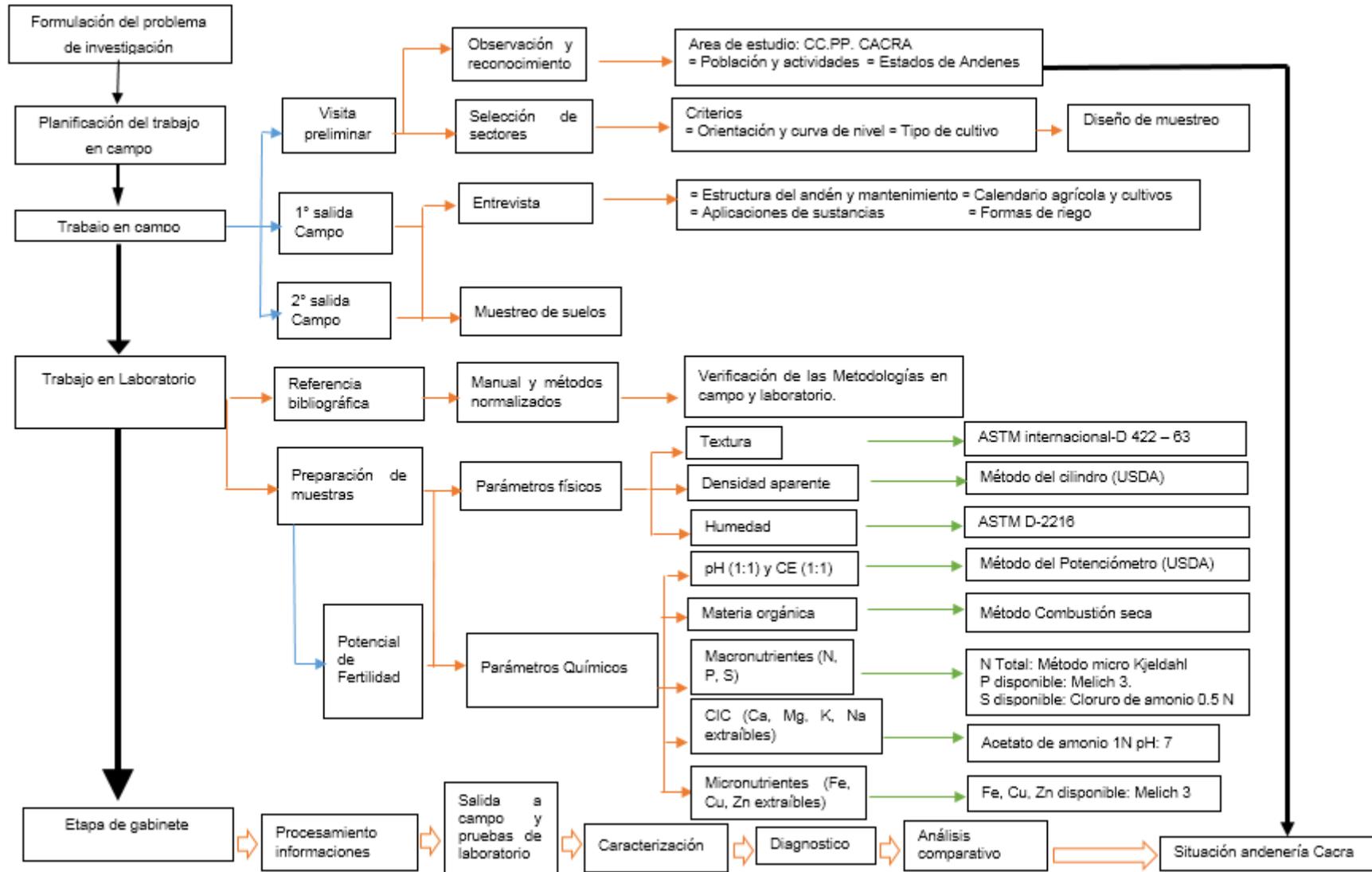


Figura 17: Esquema metodológico de investigación.



Figura 18: Estación de monitoreo de suelos en el CC.PP. Caca (Propia).

Tabla 13: Estación de monitoreo en suelos (Propia).

Perfil de muestreo	Estación de muestreo	Descripción	Coordenadas		Altitud (m s.n.m)
			WGS 84 – Zona 18S		
			Este	Norte	
I	I-30%	Cultivos de habas	414 945	8 583 701	2887
	I-60%	Sin cultivos	414 895	8 583 886	2992
	I-90%	Sin cultivos	414 840	8 584 051	3092
M	M-30%	Cultivos de maíz y habas	415 108	8 583 701	2891
	M-60%	Cultivos de albaricoque, habas y maíz	415 075	8 583 936	2987
	90%	Cultivos de albaricoque con injerto de Okinawa	415 028	8 584 091	3057
D	D-30%	Cultivos de habas y albaricoque	415 278	8 583 691	2874
	D-60%	Cultivos de maíz, y habas con alta productividad	415 248	8 583 956	2981
	D-90%	Cultivos de albaricoque con alta productividad	415 195	8 584 126	3060

3.1.2.1 Estación I-30%

Esta estación de muestreo representa las terrazas de baja pendiente ubicadas en la parte izquierda del centro poblado. En esta estación hay andenes de moderada conservación con uso de pequeñas cultivos de leguminosas y abundantes herbazales. Se observa la presencia de rocas y partículas de tamaño guijarroso (25 cm) que modifican la textura. Esta estación se caracteriza por presencia de rastrojo, baja productividad, labranza mínima y déficit de agua (los canales no llegan con mucha eficiencia) presentando en sus cultivos hojas amarillas.



Figura 19: Estación de muestreo I-30% realizada el 24/05/2015 (Propia).

3.1.2.1 Estación I-60%

Esta estación de muestreo representa las terrazas de mediana pendiente ubicadas en la parte izquierda del centro poblado. En esta estación hay andenes abandonados de baja conservación, sin uso para cultivos, por poseer una fisiografía inclinada no permite un buen manejo de sus suelos. Se observa la presencia de rocas y partículas de tamaño pedregoso (60 cm) que modifican la textura. Esta estación se caracteriza por tener un exceso de malezas, baja productividad, labranza mínima y déficit de agua (los canales no llegan con mucha eficiencia).



Figura 20: Estación de muestreo I-60% realizada el 24/05/2015 (Propia).

3.1.2.2 Estación I-90%

Esta estación de muestreo representa las terrazas de mediana pendiente ubicadas en la parte izquierda del centro poblado. En esta estación hay andenes abandonados, de baja conservación, sin uso para cultivos, por poseer una fisiografía inclinada no permite un buen manejo de sus suelos. Se observa la presencia de rocas y partículas de tamaño pedregoso (60 cm) que modifican la textura. Esta estación se caracteriza por tener poca cobertura vegetal, rastros de raíces amarillas y deterioradas, labranza mínima, déficit de agua y poca influencia humana.



Figura 21: Estación de muestreo I-90% realizada el 24/05/2015 (Propia).

3.1.2.3 Estación M-30%

Esta estación de muestreo representa las terrazas de baja pendiente ubicadas en la parte central del centro poblado. En esta estación se observa andenes de moderada conservación con uso de cultivos de frutales y gramíneas. No se observa la presencia de modificadores texturales. Esta estación se caracteriza por poseer rastrojos, buena accesibilidad al riego por canales, labranza mínima y baja productividad.



Figura 22: Estación de muestreo M-30% realizada el 24/05/2015 (Propia).

3.1.2.4 Estación M-60%

Esta estación de muestreo representa las terrazas de baja pendiente ubicadas en la parte central del centro poblado. En esta estación hay andenes de moderada conservación con uso de cultivos de frutales, gramíneos y leguminosos. No se observa la presencia de modificadores texturales. Esta estación se caracteriza por poseer cultivos sin rastrojos, buena accesibilidad al riego por canales y baja productividad.



Figura 23: Estación de muestreo M-60% realizada el 24/05/2015 (Propia).

3.1.2.5 Estación M-90%

Esta estación de muestreo representa las terrazas de alta pendiente ubicadas en la parte central del centro poblado. En esta estación hay andenes de buena conservación con uso de cultivos de frutales. No se observa la presencia de modificadores texturales. Esta estación se caracteriza por poseer cultivos con rastrojos, buena accesibilidad al riego por canales. Además, en esta zona se hace uso de injertos de Okinawa - albaricoque para mejorar la disponibilidad de nutrientes o no ser afectada por algunos microorganismos desfavorables.



Figura 24: Estación de muestreo M-90% realizada el 24/05/2015 (Propia).

3.1.2.6 Estación D-30%

Esta estación de muestreo representa las terrazas de baja pendiente ubicadas en la parte derecha del centro poblado. En esta estación se observan andenes de moderada conservación con uso de cultivos gramíneos y frutales. No se observa la presencia de modificadores texturales. Esta estación se caracteriza por poseer cultivos con rastrojos, buena accesibilidad al riego por canales pero baja productividad presentando coloración amarilla en casi todos sus cultivos.



Figura 25: Estación de muestreo D-30% realizada el 24/05/2015 (Propia).

3.1.2.7 Estación D-60%

Esta estación de muestreo representa las terrazas de mediana pendiente ubicadas en la parte derecha del centro poblado. En esta estación hay andenes de moderada conservación, con uso de cultivos gramíneos y leguminosos. No se observa la presencia de modificadores texturales. Esta estación se caracteriza por poseer cultivos con rastrojos, buena accesibilidad al riego por canales y baja productividad.



Figura 26: Estación de muestreo D-60% realizada el 24/05/2015 (Propia).

3.1.2.8 Estación D-90%

Esta estación de muestreo representa las terrazas de alta pendiente ubicadas en la parte derecha del centro poblado. En esta estación hay andenes de buen estado de conservación con uso de cultivos frutales. No se observa la presencia de modificadores texturales. Esta estación se caracteriza por poseer cultivos con restos húmicos, cobertura vegetal, buena humedad por los canales de riego y alta productividad por ser una zona con buena accesibilidad. Además en esta estación se realiza el manejo de andenes en descanso.



Figura 27: Estación de muestreo D-90% realizada el 24/05/2015 (Propia).

3.1.3 Elección de parámetros

Se seleccionaron los indicadores de la calidad física del suelo textura, estructura, porosidad, densidad, color, temperatura y humedad en el suelo. Estos parámetros físicos están relacionados principalmente al balance hídrico y la capacidad del suelo de brindar condiciones estructurales adecuadas para el sostén y crecimiento de los cultivos. Los indicadores de la calidad química del suelo son pH, capacidad intercambio catiónico, materia orgánica, contenido de macronutrientes principales (nitrógeno, fósforo, potasio), macronutrientes secundarios (calcio, magnesio, azufre disponibles) y micronutrientes (hierro, cobre, cloruros, cinc disponibles). Estos parámetros químicos están relacionados a la capacidad que tiene el suelo de proveer nutrientes esenciales a los cultivos que determinan en el crecimiento y/o desarrollo de cultivo cuando se encuentra por debajo de los niveles críticos. Además, se determinaron la concentración de aluminio y sodio intercambiables que a determinadas concentraciones afecta negativamente la calidad de los suelos agrícolas [9,87]

3.1.4 Toma de muestras

La validez de un resultado analítico depende de la toma de muestra ya que será el reflejo de lo que ocurre en el suelo. Para ello se siguen recomendaciones por

diferentes organismos competentes para asegurar la calidad de los resultados [9,85,86]. Para cada estación de muestreo de suelo, se tomó una muestra compuesta de 5 submuestras tomadas por el método del Zigzag donde se busca cubrir todo el ancho y largo de la unidad representativa. Para ello se cavó a una profundidad de 30 cm con ayuda de palas plásticas; el suelo recolectado es tomado de abajo hacia arriba en las paredes laterales del hoyo. La muestra extraída se mezcló con todas las submuestras y se guarda aproximadamente 1,5 kg por muestra en bolsa Ziploc® con cierre hermético, rotulados con su código. Finalmente, se llevó al laboratorio para su análisis posterior [85,86,88]

Para el aseguramiento de la calidad en la toma de muestra se tomó por duplicado cada punto de muestreo y se llevó una muestra de testigo para identificar muestras contaminadas.

3.2 Metodologías analíticas

Para determinar los indicadores fisicoquímicos en muestras sólidas se siguieron dos etapas. La primera fase consistió en la extracción del analito con un solvente acuoso y la segunda el análisis en el extracto. Los parámetros fisicoquímicos se determinaron en el Laboratorio de Química Ambiental y Laboratorio de Análisis Instrumental de la Sección Química de la PUCP, utilizando para ello métodos estandarizados del American Society for Testing and Materials, United States Department of Agriculture Standard Methods for the Examination of Wasterwater y del Environmental Protection Agency [9,89]

Tabla 14: Metodologías analíticas para los análisis de suelos (Propia)

Parámetro	Método	Extracto	Norma
Textura	Hidrómetro	-	ASTM D422-63
Densidad aparente	Cilindro	-	Guía USDA
humedad	Gravimétrico	-	ASTM D2974-07
Materia orgánica	Gravimétrico/LECO	-	ASTM D2974-07
Carbonatos	Método de titulación	Acuoso (1:1)	APHA 2320 B
CIC	Método de titulación	Acetato de amonio pH=7	D7503-10
Nitrógeno total	Método Kjeldahl /Leco	-	ASTM D2973-10 ^{e1}
Fósforo disponible	Método colorimétrico del ácido vanadomolibdofosforico	Melich 3	APHA 4500-P C
Potasio disponible	Método espectrométrico de absorción atómica	Acetato de amonio pH=7	APHA 3500- B
Hierro, cobre , cinc disponibles	Método espectrométrico de absorción atómica	Melich 3	APHA 3500- B
Calcio, Magnesio, Sodio extraíble	Método espectrométrico de absorción atómica	Acetato de amonio pH=7	APHA 3500- B
Sulfato	Método turbidimétrico	NH ₄ CL 0,5 N	EPA 375.4
Nitrato	Método espectrométrico ultravioleta selectivo	KCl 1N	APHA 4500-NO ₃ ⁻ B
Cloruro	Método argentométrico	Acuoso (1:1)	APHA 4500-CI B

3.2.1 Mediciones de parámetros *in situ*

3.2.2 Textura en campo

Para la determinación de este parámetro se realizó el método del tacto. La muestra de suelo es humedecida y luego frotada entre los dedos. La presencia de arcilla es caracterizada cuando el suelo se siente pegajoso y puede ser moldeada formando una especie de cinta. La arena se siente áspera y grumosa, mientras que la presencia de limo produce una sensación tersa y jabonosa [9].



Figura 28: Determinación de la textura de las muestras de suelos en campo
(Propia).

3.2.3 Estructura del suelo

Para la determinación de la estructura en las zonas de muestreo del CC.PP Caca se reconoce visualmente el tipo de estructura para la capa arable según la forma, tamaño y estabilidad del agregado como se muestra en la siguiente Figura 29 [63].



Figura 29: Determinación de la estructura del suelo (Propia).

3.2.4 Color del suelo

El color de suelo en las zonas de muestreo del CC.PP Caca se midió por comparación a colores estándar usando la tabla Munsell, la cual describe todos los posibles colores en términos de tres coordenadas: matiz (Hue) que mide la composición cromática de la luz que alcanza el ojo; claridad (Value), el cual indica la luminosidad u oscuridad de un color con relación a una escala de gris neutro y; pureza (Chroma), que indica el grado de saturación del gris neutro por el color del espectro como muestra la Figura 30 [63][66].

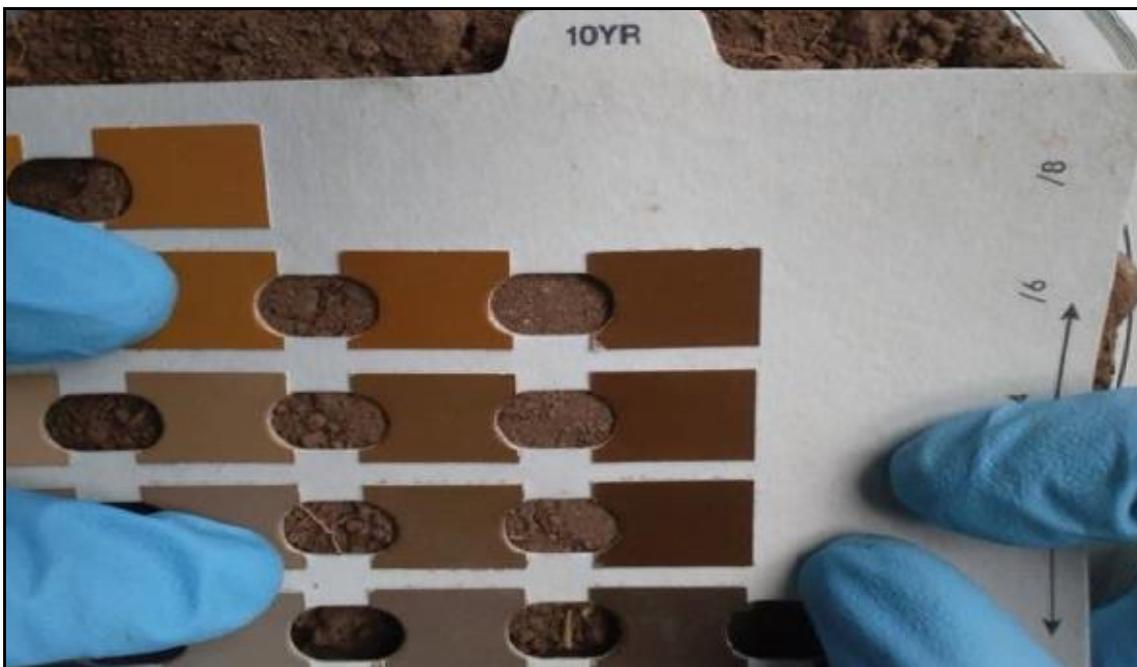


Figura 30: Determinación de color de las muestras de suelos (Propia).

3.2.5 Carbonatos

La presencia de carbonatos en el suelo se establece a través de la adición de gotas de ácido clorhídrico (HCl) al 10%. Si no hay efervescencia no hay presencia de carbonatos como se muestra en la Figura 31 [63].



Figura 31: Estimación de carbonatos en campo (Propia).

3.3 Mediciones en el laboratorio

3.3.1 Reactivos y equipos

Los reactivos y equipos utilizados en el laboratorio se encuentran mostrados en las Tabla 15 y Tabla 16.

Tabla 15: Reactivos utilizados en el laboratorio

Nombre	Fórmula química	Marca	Grado de Pureza (%)
Acetato de amonio	$\text{NH}_4\text{CH}_3\text{COO}$	Merck	99
Ácido clorhídrico	HCl	Merck	30
Ácido nítrico	HNO_3	Merck	65
Ácido oxálico	$\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$	J.T. Backer	99
Ácido sulfúrico	H_2SO_4	J.T. Backer	95-97
Carbonato de calcio	CaCO_3	Scharlau	99
Carbonato de sodio	Na_2CO_3	Merck	99
Cloruro de bario	BaCl_2	Merck	99
Cloruro de sodio	NaCl	J.T. Baker	99
Cloruro de potasio	KCl	J.T. Baker	99.99
Cloruro de potasio	K_2CrO_4	Scharlau	99
Etanol	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$	J.T. Baker	99.9
Estándar de Cd 1000 mg/L	$\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$	Merck	99.99
Estándar de Ca 1000 mg/L	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	Merck	99.99
Estándar de Cu 1000 mg/L	$\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$	Merck	99.99
Estándar de Fe 1000 mg/L	$\text{Fe}(\text{NO}_3)_2$	Merck	99.99
Estándar de Mg 1000 mg/L	$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$	Merck	99.99
Estándar de Pb 1000 mg/L	$\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$	Merck	99.99
Estándar de Na 1000 mg/L	NaNO_3	Merck	99.99
Estándar de Zn 1000 mg/L	$\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$	Merck	99.99
Fosfato de potasio monobásico	KH_2PO_4	Merck	99
Glicerina	$\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$	J.T. Baker	99
Hidróxido de amonio	NH_4OH	Merck	30
Hidróxido de sodio	NaOH	Merck	99.9

Indicador de anaranjado de	$C_{14}H_{14}N_3NaO_3S$	J.T. Baker	99
Indicador de fenolftaleína	$C_{20}H_{14}O_4$	J.T. Baker	99
Metal aluminio	Al	Merck	99
Metavanadato de amonio	NH_4VO_3	Merck	99
Molibdato de amonio	$(NH_4)_5Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$	J.T. Baker	99
Nitrato de plata	$AgNO_3$	Merck	99
Nitrato de potasio	KNO_3	Merck	99
Óxido de lantano	La_2O_3	Aldrich	99.9
Oxalato de sodio	$Na_2C_2O_4$	J.T. Baker	99
Permanganato de potasio	$KMnO_4$	Merck	99
Peróxido de hidrógeno	H_2O_2	Merck	30
Sulfato de aluminio y potasio	$AlK(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$	Merck	99.9
Sulfato de sodio	Na_2SO_4	Merck	99.9
Tiosulfato de sodio	$Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$	J.T Baker	99.9

Tabla 16: Equipos utilizados en el laboratorio (Propia).

Equipo	Marca	Modelo
Estufa	MMM Group	Ecocell 55 (Tmáx: 250°C)
Mufla	Thermo Scientific	F 48010 (Tmáx:1000°C)
Balanza analítica digital	OHAUS®	Adventurer (capacidad máxima de 210 g y sensibilidad de 0,1mg)
Plancha de agitación	Thermo Scientific	SP131635Q
Plancha de calentamiento	Thermolyne Corporation	HP-A224OM
Espectrofotómetro UV-Visible	Agilent	8453
Espectrómetro de absorción atómica de llama	Perkin Elmer	PinAAcle 900H
Multiparámetro portable	Thermo Electrom Corporation	Orión 230A+
Lámparas de cátodo hueco de Ca, Na, Fe, Al, Zn, Cu, Pb y Cd.	Perkin Elmer	-
GPS	Magellan	GPS 315
Tamices	ASTM	63um, 72.5um y 2mm
Cocinilla	Cimarec	Barnsted Thermoline
Hidrómetros	-	151H y 152H
Bomba de vacío	Vacuubrand	ME 4N RT
Cuartheador	-	Mecánico de acero inoxidable
Conductimetro	Ino Lab	Cond 730
pH-metro portátil	Hanna	Modelo HI98128
Centrífuga	HETTICH	EBA 85
Mufla	Thermo Scientific	Thermoline
Analizador de carbono/nitrógeno	Leco©	TruMac
Agitador lineal	-	-
Espectrómetro fluorescencia de rayos X portátil	Bruker	Tracer

3.3.2 Preparación de las muestras

Es necesario el manejo de las muestras de suelo cuando llegan al laboratorio. Las operaciones que implicaron fueron: identificación, secado, molienda y tamizado [87].

En el cuaderno de registro se anotaron datos sobre la procedencia, así como el tipo de análisis que requieren las muestras que llegan al laboratorio para su análisis [87].

Las muestras de suelo que llegan al laboratorio (en una cantidad aproximada de 1 kg), fueron secadas al aire en un lugar seco y protegido de posibles contaminaciones por 48 h. Y, en algunos casos, se seca en una estufa a una temperatura de 25° C por 24 h.

Debido a los rápidos cambios que se producen en el estado de algunas especies iónicas por efecto del secado, el análisis de nitratos se realizó sobre muestras húmedas. En este caso, fue necesario determinar el porcentaje de humedad para luego hacer las correcciones en la expresión del contenido. Una vez secada la muestra, una porción puede ser guardada en frascos para la contramuestra [87].

En el análisis de suelos con fines agrícolas se emplea el concepto de tierra fina secada al aire (TFSA). TFSA es aquella que ha pasado por el tamiz de 2,0 mm de diámetro. En consecuencia, los agregados de suelo son rotos mediante molienda usando un mortero de porcelana. Se debe evitar moler partículas de grava o cascajo. Durante el proceso de secado de la muestra se deben remover restos de hojas o raíces así como agregados muy duros [87].

La muestra obtenida luego del tamizado se mezcló uniformemente en un cuarteador mecánico en una bandeja limpia repitiendo el proceso tres veces para lograr su uniformidad. Terminado este proceso, la muestra estuvo preparada para ser trabajada en el laboratorio y los análisis pudieron ser realizados [87].

3.3.3 Análisis Elemental por FRX

Para el análisis cualitativo de las muestras de suelo se realizó el análisis por FRX con la finalidad de identificar su composición elemental total. Para ello, se colocó directamente la muestra del suelo en el instrumento sobre una película de polipropileno de 3 cm diámetro marca Chemplex y los picos fueron asignados aplicando solo las líneas K. El espectrograma de la muestra se obtuvo junto al espectrograma del blanco para eliminar el ruido de fondo y eliminar elementos presentes en el parafilm como el calcio, fósforo, hierro, cobre, cinc, aluminio y el titanio que se encuentran en concentraciones de ppm.

3.3.4 Determinación de textura

Para la determinación de la textura de muestras del suelo se utilizó el método del hidrómetro empleando la norma ASTM D422-63 [90]. Esta técnica se basa en el principio de la velocidad de la caída en un medio líquido, característica dependiente del tamaño de partícula y que se puede calcular mediante la fórmula de Stokes. Para realizar este análisis se preparó 125 mL de una solución de hexametáfosfato de sodio (NaPO_3) de 40 g/L para la dispersión de las partículas de 50 g de TFSA pesado con la ayuda de una balanza de un decimal. La suspensión se agitó suavemente con una bagueta de vidrio, se cubrió el vaso de dispersión con Parafilm® y se dejó reposar por 24 h. Una vez pasado el tiempo, se retiró el Parafilm® del vaso y se agitó vigorosamente en una cocinilla por 5 minutos. Luego de transcurrido el tiempo se transfirió la suspensión del suelo en una probeta de 1 L, lavando el suelo remanente que queda dentro del vaso de dispersión completando hasta dicho volumen con agua destilada. Se agitó la probeta de un litro de tal modo que todo el sedimento desaparezca de la base de la probeta. Se introdujo inmediata y cuidadosamente el hidrómetro ASTM-152 H dentro de la suspensión para la toma de lectura de la densidad de suspensión y temperatura a 40s y 2h controlados por un cronómetro. La lectura a los 40 s es una medida de cantidad de la cantidad de limo más arcilla en suspensión. La lectura a las 2 horas se supone como una medida de la cantidad de arcilla [90].

3.3.5 Determinación de densidad aparente

Para la determinación de la densidad aparente de muestras del suelo se utiliza el método del cilindro (USDA). Esta técnica se basa en la medición de la masa de una muestra de suelo extraída en el campo utilizando un cilindro de volumen conocido. Para el análisis de densidad aparente se colocó horizontalmente los cilindros biselados directamente al suelo hasta el ras del perfil con la ayuda de un martillo. Se sacan cuidadosamente los cilindros con la muestra de suelo contenidas en ellas y se colocan en bolsas Ziploc®. En el laboratorio se transfieren las muestras del suelo contenidas en el cilindro a bandejas de aluminio, previamente pesadas y colocadas en una estufa a 105°C por 24 h. Finalmente se enfría en desecador de sílica gel y se pesa en una balanza de un decimal [9].



Operaciones realizadas en campo.

Operaciones realizadas en el laboratorio.

Figura 32: Determinación de la densidad aparente (Propia).

3.3.6 Determinación de carbonatos

Para la determinación de carbonatos se utilizó el método de titulación con APHA 2320 B. Para el análisis se pesaron 200 g de suelo y se forma una suspensión 1:1 con H₂O. Se tomó una alícuota de 100 mL y se tituló con H₂SO₄ 0,02 ± 1,15 x10⁴ utilizando el indicador de fenolftaleína. [89]

3.3.7 Determinación de pH

Para la determinación del pH se utilizó el método potenciométrico descritos en el manual de la USDA. Para el análisis se usaron dos extractantes para formar la suspensión 1:1 H₂O y 1:1 KCl 1N. Con la primera suspensión se determinó la acidez de la solución del suelo y con la segunda suspensión se determinó la acidez cambiante, que son elementos adsorbidos como el aluminio e hidrógeno que se encuentran en el complejo de cambio [9].

3.3.8 Determinación de conductividad eléctrica

Para la determinación de la CE se utilizó el método conductimétrico. Para ello se formó una suspensión 1:1 suelo/agua. Se pesó 150 g de suelo y se añadió 150 mL de agua desionizada. Se agitó vigorosamente por una hora y se dejó reposar por 24 horas. Se filtró en una centrífuga de 4000 rpm por 20 minutos (90). Finalmente, se realizaron las mediciones de conductividad a la solución transparente. Los resultados obtenidos en este caso son convertidos de esta suspensión 1:1 a la del extracto de saturación usando un factor igual a dos [69].

3.3.9 Determinación de humedad

Para la determinación de la humedad del suelo se empleó la norma ASTM D2974-07. Para el análisis se pesaron 200 g de suelo y se colocaron en una estufa a 105°C por 24 horas. Se enfrió en un desecador de sílica gel y se pesó en una balanza de un decimal. Los resultados de la humedad del suelo se expresaron gravimétricamente en relación a la masa del suelo seco [91].

3.3.10 Determinación de materia orgánica

Para la determinación de la materia orgánica se empleó la norma ASTM D2974-07. Para el análisis se pesa 1,5 g de suelo y se coloca en una estufa a 450°C por 4 horas. A esta temperatura, el carbono orgánico se volatiliza; luego de transcurrido el tiempo se enfría en un desecador de sílice gel y se pesa en una balanza de un decimal. [91]

Para la comparación de determinación de carbono se usa el analizador C/N modelo Trumac marca Leco®. Para el análisis se pesa 0,5 g de muestra en un crisol de porcelana; los análisis se realizan por triplicado y como control se utilizan blancos y estándares de EDTA.

3.3.11 Determinación de nitrógeno total

Para la determinación del nitrógeno total se empleó la norma ASTM D2973-10⁹¹. Para el análisis según la norma se usó el método Kjeldahl. La muestra sufrió un proceso de digestión con una mezcla catalizadora que contiene H₂SO₄ y K₂SO₄. La presencia del H₂SO₄ cumple con la finalidad de destruir el material carbonáceo y el K₂SO₄ sirve para elevar el punto de ebullición del H₂SO₄, acelerar la reacción y prevenir las pérdidas del nitrógeno por volatilización. En el proceso de digestión se libera N en forma de NH₃ y forma (NH₄)₂SO₄. Un sistema de destilación es usado para realizar la determinación cuantitativa del nitrógeno en la solución que sufrió la digestión. Una cantidad de NaOH es adicionado para dar un carácter alcalino a la solución y el nitrógeno puede así ser liberado como NH₃ (g). El amoniaco destilado fue recolectado en una solución de ácido bórico luego el ácido bórico más la mezcla de la solución destilada, es titulado con ácido sulfúrico H₂SO₄ estandarizado [92].

Para la determinación de nitrógeno total se usó el analizador C/N modelo Trumac marca Leco®. Para el análisis se pesó 0,5 g de muestra en un crisol de porcelana; los análisis se realizaron por triplicado y como control se utilizaron blancos y estándares de EDTA.

3.3.12 Determinación de nitratos

Para la determinación del nitrato se empleó la extracción con KCl 1N para 2,5 g de suelo a humedad actual y para el análisis de nitrato en la solución se empleó la norma APHA 4500-NO₃- B: Método espectrométrico ultravioleta selectivo. Para las muestras y patrones de la curva de calibración se añadió un mililitro de solución de HCl 1N para una alícuota de 50 mL. Finalmente se restó dos veces la absorbancia referida a 275 nm de la lectura a 220 nm para obtener la absorbancia referida a nitratos [89]

3.3.13 Determinación de fósforo disponible

Para la determinación de fósforo se empleó la extracción con el solvente universal Mehlich3(CH₃COOH0,2M+NH₄NO₃0.25M+NH₄F0.015M+EDTA[ácidoetiendiaminotetra acético]) y para el análisis del fósforo en la solución se empleó el método colorimétrico del ácido vanadomolibdofosfórico descrito en la norma APHA 4500-P C.[89,93]

Para las muestras y patrones de la curva de calibración se añadió 10 mL de la solución colorante amarillo de vanadatomolibdato para una alícuota de muestra de 50 mL. Finalmente, se midió la absorbancia de las muestras a 400nm.

3.3.14 Determinación de azufre disponible

Para la determinación del azufre disponible se empleó 20 mL de la solución extractora de NH₄Cl 0,5N para 5 g de la muestra de suelo. Se agitó por 15 minutos en un agitador mecánico y se filtró usando papel filtro Whatman No. 5. Para el análisis del azufre disponible en el agua se empleó el método turbidimétrico descrito en la norma EPA 375.4 [94].

Para las muestras y patrones se añade 1 mL del reactivo de siembra y 1 mL del reactivo de precipitación; luego se mezcló y se dejó en reposo por 10 minutos. Finalmente, se leyó la transmitancia a longitud de onda de 420 nm.

3.3.15 Determinación de micronutrientes

Para la determinación de los micronutrientes Fe, Cu y Zn se empleó la extracción con el solvente universal Mehlich3, y para el análisis de los micronutrientes en la solución se empleó el método espectrométrico de absorción atómica descrito en la norma APHA 3500- B [89].

3.3.16 Capacidad de intercambio catiónico

Para la determinación de la capacidad de intercambio catiónico se utilizó el método del acetato de amonio descrito en la norma ASTM D2973-10^{e1} .Para el análisis se colocó 5g de la muestra de suelo sobre un embudo con papel de filtro ligeramente

humedecido y se lavó con un exceso de 100 mL de solución de acetato de amonio 1N pH 7,0 con el objeto de remover los cationes cambiables y saturar el suelo con amonio. Se recibió el lavado para determinar los cationes intercambiables Ca, Mg, K y Na por fotometría de llama [95]. El exceso de amonio presente en los poros del suelo se lavó con 25 mL de alcohol etílico. Luego, se lavó el suelo con 100 mL de KCl 1N con la finalidad de desplazar el amonio absorbido. Se tomó una alícuota de 10 mL del filtrado y se destiló en presencia de 3 mL de una base fuerte NaOH colectando el destilado en ácido bórico al 2% más indicador mixto. Finalmente fue titulado por H_2SO_4 0,02N y calculado en términos de miliequivalentes por 100g de suelo o centimoles por kg de suelo. Este método de destilación es conocido como método de Kjeldahl [95] [92]

3.3.17 Manejo de residuos

Para realizar una adecuada y responsable gestión de los desechos generados por los análisis químicos y, así reducir los impactos negativos en el medio donde se generen. Para los residuos inorgánicos líquidos generados en el laboratorio se clasificaron los residuos inorgánicos ácidos, neutros, tóxicos y básicos para desecharlos en contenedores de plástico correspondientes.

Los materiales sólidos con restos de sustancias inorgánicas no tóxicas se desecharon en bolsas plásticas negras y para las tóxicas se separaron en un contenedor. Para los materiales de vidrio roto se clasificó el material contaminado y no contaminado. Luego fueron separados en contenedores diferentes.

Finalmente, los residuos líquidos y sólidos almacenados correctamente, se entregaron al Almacén de Reactivos de la Sección Química para que se proceda con la disposición y tratamiento final.

4 RESULTADOS

4.1 Resultados de parámetros en campo

4.1.1 Color

El color presentado en los suelos del CC. PP. Caca en las dos campañas no mostró diferencia en matiz, claridad y pureza según la tabla de Munsell, excepto en la estación M-30% que presenta menor claridad en mayo/2015 que en julio/2015 indicando que hubo una mayor humedad en la primera campaña. Además, la estación D-90% presenta una coloración menos clara por la presencia de material húmico.

En general, el color de los suelos presenta el mismo matiz YR correspondientes a que las muestras presentan compuestos de hierro observándose en todas las muestras pequeñas granos amarillos cristalinos de pirita propios de la geoquímica natural del suelo.

4.1.2 Estructura

La estructura en los suelos del CC.PP. Caca no presentó diferencia en las dos campañas para todas las estaciones. Los suelos presentan una estructura de forma granular indicando que las raíces pueden penetrar fácilmente la parte superficial del suelo, buena disponibilidad de agua, buena circulación de oxígeno, y favorece el movimiento de las lombrices. En general, el tamaño de los granos es fino, excepto en las estaciones I-30% y I-60% en donde fue de tamaño medio prevaleciendo en estas estaciones mayor contenido de arena. Además la última estación presentó una mayor estabilidad que las demás observando que los agregados son prominentes y visibles.

4.1.3 Textura

La estimación de la textura en los suelos del CC.PP. Caca indicó la presencia de un contenido alto en arena y al ser humedecidas presento baja resistencia a las deformaciones para ambas campañas.

4.1.4 Carbonatos

El análisis cualitativo de carbonatos en los suelos del CC.PP. Caca indicó que no hubo presencia de carbonatos para las dos campañas.

Tabla 17: Resultados de parámetros realizados en campo.

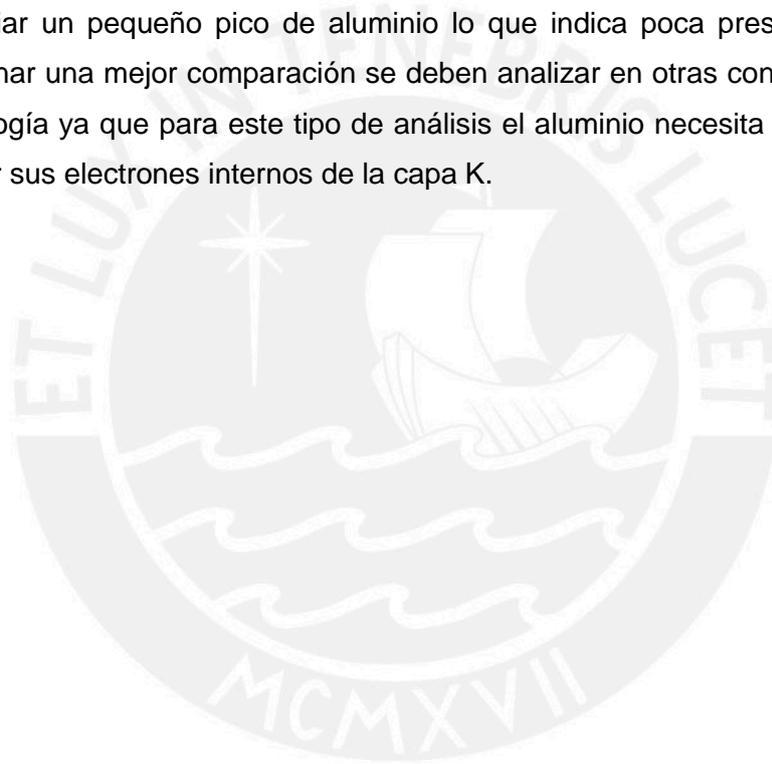
Estación	Color 24/05/15	Color 19/07/15	Estructura (ambas campañas)	Estimación Textura (ambas campañas)
I-30%	Muy oscuro grisáceo 10YR3/1	Muy oscuro grisáceo 10YR3/1	Granular grueso moderada	Contenido alto en arena
M-30%	Muy oscuro grisáceo 10YR3/1	Oscuro grisáceo 10YR4/1	Granular medio moderada	Contenido alto en arena
D-30%	Pardo 10YR4/3	Pardo 10YR4/3	Granular grueso moderada	Contenido alto en arena
I-60%	Muy oscuro grisáceo 10YR3/1	Muy oscuro grisáceo 10YR3/1	Granular grueso moderada	Contenido alto en arena
M-60%	Pardo oscuro 10YR3/3	Pardo oscuro 10YR3/3	Granular fino moderada	Contenido alto en arena
D-60%	Pardo grisáceo muy oscuro 10YR3/2	Pardo grisáceo muy oscuro 10YR3/2	Granular fino moderada	Contenido alto en arena
I-90%	Muy oscuro grisáceo 10YR3/1	Muy oscuro grisáceo 10YR3/1	Granular fino moderada	Contenido alto en arena
M-90%	Muy oscuro grisáceo 10YR3/1	Muy oscuro grisáceo 10YR3/1	Granular fino moderada	Contenido alto en arena
D-90%	Pardo muy oscuro 10YR2/2	Pardo muy oscuro 10YR2/2	Granular fino fuerte	Contenido alto en arena

*: La cantidad de carbonatos en campo no fue detectado para todas las estaciones

4.2 Resultados de parámetros en laboratorio

4.2.1 FRX

El análisis por fluorescencia de rayos X (FRX) dispersiva en energía ha permitido la identificación elemental de suelos del CC.PP. Caca. Como se muestra en la Figura 33 en el espectrograma de FRX se observa un pico característico de Fe de alta intensidad expresada en cuentas por segundo la cual se relaciona con la concentración del elemento indicando que el hierro es un elemento mayoritario en las muestras. Además, presenta picos de menor intensidad para los elementos en forma total de azufre, potasio, calcio, magnesio (considerados macronutrientes para las plantas), así como cobre, cinc y manganeso, considerados micronutrientes para las plantas. Se puede apreciar un pequeño pico de aluminio lo que indica poca presencia, aunque para determinar una mejor comparación se deben analizar en otras condiciones o con otra metodología ya que para este tipo de análisis el aluminio necesita mayor energía para remover sus electrones internos de la capa K.



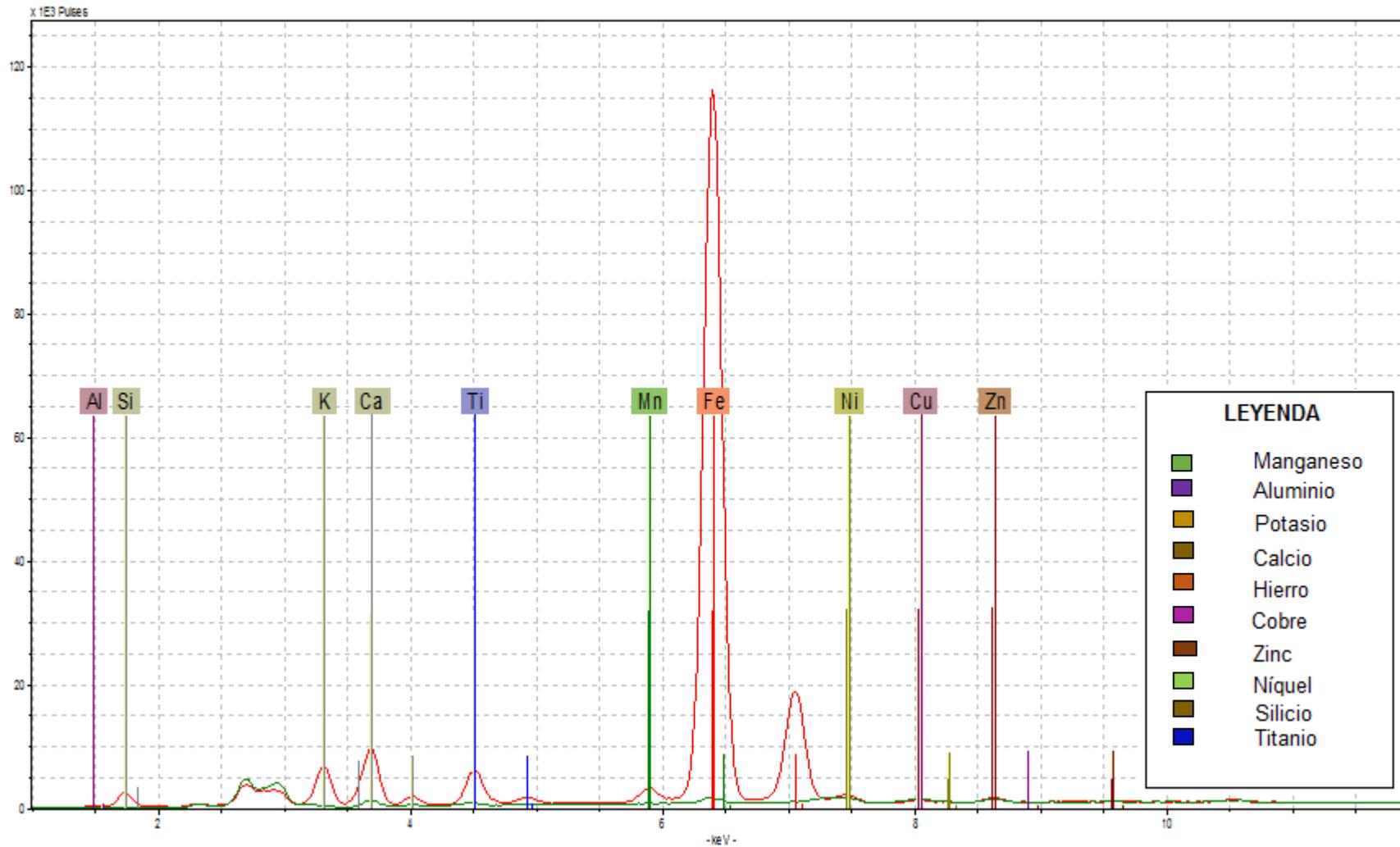


Figura 33: Análisis de FRX para los suelos CC.PP. Caca.

4.2.2 Textura

La textura en los suelos CC.PP Caca no presentó diferencia para las dos campañas realizadas. Esto indica que es un parámetro estable en el tiempo. En general, todas las estaciones presentan una clase textural franco arcillo arenoso, con excepción de las estaciones I-30% y I-60% que presentaron una clase textural franco arenosa como se muestra en la Tabla 18 y Tabla 19.

Los perfiles de las zonas I y M presentaron suelos con dos clases texturales del tipo franco arcillo arenoso y franco arenoso aumentando el contenido de arcilla a mayores altitudes. El perfil de la zona D presentó suelos con una clase texturales del tipo franco arcillo arenoso aumentando el contenido limoso a mayores altitudes.

Tabla 18: Resultados de la textura del suelo en laboratorio realizado el 24/05/15.

Estaciones	Arena %	Limo%	Arcilla%	Clase textural
I-30%	66,56	15,60	17,84	Franco arenoso
M-30%	60,56	11,00	28,44	Franco arcillo arenoso
D-30%	51,56	18,80	29,64	Franco arcillo arenoso
I-60%	67,56	16,80	15,64	Franco arenoso
M-60%	66,56	10,20	23,24	Franco arcillo arenoso
D-60%	64.56	14.00	21.44	Franco arcillo arenoso
I-90%	64.56	13.60	21.84	Franco arcillo arenoso
M-90%	65.56	12.00	22.44	Franco arcillo arenoso
D-90%	61.56	18	20.54	Franco arcillo arenoso

Tabla 19: Resultados de la textura del suelo en laboratorio realizado el 19/07/15.

Estaciones	Arena %	Limo%	Arcilla%	Clase textural
I-30%	65,06	16,10	18,84	Franco arenoso
M-30%	60,96	10,70	28,34	Franco arcillo arenoso
D-30%	52,76	17,80	29,44	Franco arcillo arenoso
I-60%	66,06	17,30	16,64	Franco arenoso
M-60%	65,36	11,20	23,44	Franco arcillo arenoso
D-60%	66,06	13,00	20,94	Franco arcillo arenoso
I-90%	65,96	12,60	21,44	Franco arcillo arenoso
M-90%	64,06	13,00	22,94	Franco arcillo arenoso
D-90%	60,06	19,20	20,74	Franco arcillo arenoso

4.2.3 Densidad

La densidad aparente en el suelo del CC.PP. Caca no presentó diferencia significativa a un nivel de confianza del 95 % para las dos campañas realizadas. Esto indica que el suelo es manejado bajo un sistema de labranza cero o labranza mínima, sin uso de maquinarias. En general, los valores de densidad en todas las estaciones están entre 1,7 y 1,70 g.cm⁻³. Las estaciones I-30% y I-60% son las que presentaron mayores valores respecto a las demás mostrados en la Tabla 20.

El perfil de la zona I presentó valores de densidad significativamente iguales al pasar de una longitud altitudinal del 30 % al 60% pero luego disminuyó al aumentar a una de 90%.

Los perfiles de las zonas M y D presentaron valores de densidad que aumentaron al pasar de una longitud altitudinal del 30 % al 60% pero luego disminuyeron al aumentar a una de 90%.

Tabla 20: Resultados de la densidad aparente en las dos campañas en muestras inalteradas.

Estación	Profundidad (cm)	σ aparente (g.cm ⁻³) 24/05/15	Comparación 24/05/15	σ aparente (g.cm ⁻³) 19/07/15	Comparación 19/07/15
I-30%	20	1,77±0,14	A	1,7±0,15	A
I-60%	20	1,74±0,10	A	1,76±0,16	A
I-90%	20	1,47±0,10	BC	1,67±0,16	BC
M-30%	20	1,48±0,11	B	1,35±0,11	B
M-60%	20	1,54±0,12	B	1,5±0,13	B
M-90%	20	1,47±0,10	BC	1,45±0,13	BC
D-30%	20	1,41±0,10	BC	1,45±0,13	BC
D-60%	20	1,57±0,12	AB	1,66±0,16	AB
D-90%	20	1,27±0,10	C	1,30±0,11	C

Estaciones significativamente iguales poseen misma letra (prueba de TUKEY al 95% de confianza). N: 4

4.2.4 Carbonatos

Los suelos del CC.PP Caca presentaron concentraciones de carbonatos por debajo del límite de detección para las dos campañas realizadas indicando que el medio es neutro o ácido.

4.2.5 pH

Los resultados de pH en el suelo del CC.PP Caca para las dos campañas realizadas presentaron una diferencia significativa a un nivel de confianza del 95 % para ambos extractos como se muestran en la Tabla 21 y Tabla 22. Esto indica que los valores de pH disminuyeron en la temporada de estiaje respecto a la temporada de altas precipitaciones debido al incremento de iones hidronio en el suelo.

En general, los valores de pH en todas las estaciones fueron mayores a 5,5, con excepción a la estación M-60 % la cual presentó un pH <5,5.

En el extracto 1:1 la estación M-60 % presenta valores de pH menores a 5.5 para ambas campañas .Y en el extracto de KCL 1N solo ocurre en la primera campaña. Además para todas las estaciones, los valores de pH en agua destilada son mayores y más variables con respecto al pH en KCL 1N mostrando que hay una liberación de los iones hidronios intercambiables por sustitución del potasio.

Los perfiles de las zonas I, M y D en las dos campañas y en los dos extractos no presentaron variaciones significativas en todo el transecto vertical, excepto en la

estación M-60% la cual presentó características más ácidas indicando la presencia de aluminio en esta zona.

Tabla 21: Resultados del pH extracto 1:1 en las dos campañas medidas en el laboratorio.

Estación	Profundidad (cm)	pH (1:1) 24/05/15	Comparación 24/05/15	pH (1:1) 19/07/15	Comparación 19/07/15
I-30%	20	6,11±0,21	C	5,77±0,13	A
I-60%	20	6,11±0,21	C	5,58±0,11	AB
I-90%	20	6,05±0,19	C	5,79±0,13	A
M-30%	20	6,44±0,29	C	5,84±0,17	A
M-60%	20	5,78±0,13	D	5,49±0,11	B
M-90%	20	5,98±0,28	C	5,79±0,13	A
D-30%	20	6,07±0,19	C	5,89±0,09	A
D-60%	20	6,15±0,23	C	5,78±0,13	A
D-90%	20	5,88±0,09	CD	5,97±0,16	A

Estaciones significativamente iguales poseen misma letra (prueba de TUKEY al 95% de confianza). N: 4.

Tabla 22: Resultados del pH con KCl 1N en las dos campañas medidas en el laboratorio.

Estación	Profundidad (cm)	pH (KCl 1N) 24/05/15	Comparación 24/05/15	pH (KCl 1N) 19/07/15	Comparación 19/07/15
I-30%	20	5,76±0,05	C	5,52±0,08	A
I-60%	20	5,91±0,11	C	5,51±0,07	A
I-90%	20	5,70±0,0,5	C	5,53±0,09	A
M-30%	20	5,78±0,05	C	5,55±0,09	A
M-60%	20	5,31±0,03	D	5,06±0,07	B
M-90%	20	5,69±0,04	C	5,54±0,09	A
D-30%	20	5,76±0,05	C	5,58±0,09	A
D-60%	20	5,71±0,05	C	5,53±0,09	A
D-90%	20	5,80±0,10	C	5,58±0,09	A

Estaciones significativamente iguales poseen misma letra (prueba de TUKEY al 95% de confianza). N: 4.

4.2.6 Conductividad eléctrica

La CE en los suelos del CC.PP Caca presentó valores menores a 4×10^{-3} dS/m indicando que los suelos no tienen muchas sales solubles en la solución suelo y los cultivos pueden extraer el agua disponible sin ningún estrés hídrico.

Los resultados de CE en todas las estaciones presentaron una disminución significativa para las dos campañas. Durante las épocas de altas precipitaciones se produce el drenaje de los iones de la solución suelo y la absorción de los nutrientes por las raíces de las plantas.

Los perfiles de la zona I, M y D en las dos campañas presentaron variaciones significativas en todo el transecto vertical. Se observó que en las partes altas hubo menor contenido de sales disueltas, excepto en la estación M-90% y D-90% como se muestra en la Tabla 23.

Tabla 23: Resultados de la conductividad eléctrica en las dos campañas medidas en el laboratorio

Estación	Profundidad (cm)	C.E dS/m (x10-3) Pasta saturada. 24/05/15	Comparación 24/05/15	C.E dS/m (x10-3) Pasta saturada 19/07/15	Comparación 19/07/15
I-30%	20	2,72±0,33	B	1,82±0,21	E
I-60%	20	2,34±0,25	BC	1,64±0,20	EF
I-90%	20	1,86±0,23	C	1,34±0,12	F
M-30%	20	2,54±0,27	A	3,02±0,39	E
M-60%	20	1,86±0,25	B	2,52±0,25	F
M-90%	20	2,58±0,29	B	2,52±0,25	E
D-30%	20	4,22±0,52	AB	2,86±0,31	D
D-60%	20	2,42±0,32	B	2,28±0,22	E
D-90%	20	3,96±0,48	A	3,36±0,50	D

Estaciones significativamente iguales poseen misma letra (prueba de TUKEY al 95% de confianza). N: 4.

4.2.7 Humedad

En general, los valores de humedad son variable y dependientes en las estaciones están entre 10 y 26 %. Las estaciones D-90% y M-90% son las que presentan mayores valores respecto a las demás. La humedad en los suelos del CC.PP Caca presentó variaciones significativas entre las dos campañas realizadas observándose una disminución en todas las estaciones, excepto las estaciones I-90 % y M-90%. Esta variabilidad se debe a la presencia de tanto de cultivos de riego y seco.

El perfil de la zona I presenta valores de humedad significativamente iguales en todo el transepto vertical. El perfil de la zona M presenta valores de humedad que disminuyen significativamente al subir la longitud altitudinal de 30% al 60%, atribuyendo esta pérdida a los factores climatológicos y fisiográficos como altas pendientes, mayor exposición solar, evapotranspiración de los cultivos y bajo contenido de arcilla. Aumentando significativamente al subir la gradiente altitudinal de 60% al 90%, debido al contenido de materia orgánica que tiene una alta capacidad de absorción y retención de la humedad.

El perfil de la zona D presenta valores de humedad que no varían significativamente al subir la longitud altitudinal de 30% al 60%. Sin embargo, aumentan significativamente

al subir el gradiente altitudinal de 60% al 90%, debido al contenido de materia orgánica como se muestra en la Tabla 24.

Tabla 24: Resultados del porcentaje de humedad en las dos campañas medidas en laboratorio.

Estación	Profundidad (cm)	Humedad (%) 24/05/15	Comparación 24/05/15	Humedad (%) 19/07/15	Comparación 19/07/15
I-30%	20	13,26 ±0,08	B	10,19±0,07	C
I-60%	20	10,68±0,06	B	10,26±0,07	C
I-90%	20	09,47±0,06	B	12,05±0,07	C
M-30%	20	17,24±0,01	B	10,58±0,05	B
M-60%	20	12,88±0,06	B	11,07±0,07	C
M-90%	20	17,56±0,06	A	20,35±0,11	B
D-30%	20	16,92±0,07	B	10,66±0,05	B
D-60%	20	16,06±0,08	B	14,68±0,09	B
D-90%	20	25,13±0,15	A	23,92±0,15	A

Estaciones significativamente iguales poseen misma letra (prueba de TUKEY al 95% de confianza). N: 4.

4.2.8 Materia orgánica

La cantidad de materia orgánica presente en los suelos del CC.PP. Caca está entre 2,5 - 7,5%. Las estaciones D-90% y M-90% son las que presentan mayores valores respecto a las demás como se muestra en la Tabla 25.

La materia orgánica en los suelos del CC.PP Caca no presentó variaciones significativas entre las dos campañas indicando que se encuentra en forma estable (humus) y/o debido a la baja eficiencia de descomposición por parte de la actividad biológica en un medio ácido.

Los perfiles de la zona I, M y D presentaron valores de materia orgánica que aumentaron significativamente al subir la longitud altitudinal, atribuyendo este aumento al buen manejo de conservación de suelos, a los microorganismos fijadores de carbono y a los efectos climatológicos como bajas temperaturas, baja oxigenación, baja humedad y en algunos casos bajos nutrientes que afectan a la actividad biológica para su posterior descomposición.

Tabla 25: Resultados de materia orgánica en las dos campañas medidas en el laboratorio.

Estación	Profundidad (cm)	M.O (%) 24/05/15	Comparación 24/05/15	M.O. (%) 19/07/15	Comparación 19/07/15
I-30%	20	2,34±0,01	D	2,23±0,09	D
I-60%	20	3,09±0,15	C	2,91±0,11	C
I-90%	20	2,44±0,03	CD	2,55±0,09	CD
M-30%	20	3,72±0,18	B	3,59±0,15	B
M-60%	20	3,58±0,16	C	3,50±0,15	C
M-90%	20	4,73±0,25	B	4,69±0,19	B
D-30%	20	3,69±0,17	BC	3,48±0,15	BC
D-60%	20	4,47±0,02	B	4,51±0,18	B
D-90%	20	7,26±0,55	A	6,55±0,23	A

Estaciones significativamente iguales poseen misma letra (prueba de TUKEY al 95% de confianza). N: 4.

4.2.9 Nitrógeno total

El nitrógeno total en los suelos del CC.PP. Caca está entre 0,02 - 0,15%. La estación D-90% presentó un mayor valor respecto a las demás. El contenido de nitrógeno de los suelos del CC.PP Caca presentó variaciones significativas entre las dos campañas. En la mayoría de las estaciones se observó un decrecimiento en el contenido de nitrógeno indicando que hubo una disminución debido a la volatilización, lixiviación y la absorción del nitrógeno mineral por las raíces de las plantas mostradas en la Tabla 26 [96].

Los perfiles de las zonas I, M y D presentaron concentraciones de nitrógeno significativamente variable a lo largo de la longitud altitudinal, atribuyendo esta variabilidad a la actividad microbiana, condiciones climáticas y manejo del productor.

La relación C/N en todas las estaciones superó el valor de 15 para ambas campañas realizadas. Esto indica que la liberación de nitrógeno es muy baja; en un grado mayor para la primera campaña. Además, la estación D-90% presentó el menor valor de C/N con respecto a las demás estaciones indicando la baja descomposición de su materia orgánica en el suelo como se muestra en la Tabla 27.

Tabla 26: Resultados de nitrógeno total por combustión

Estación	Profundidad	N (%) 24/05/15	Comparación 24/05/15	N (%) 19/07/15	Comparación 19/07/15
I-30%	20	0,041±0,004	D	0,022±0,006	D
I-60%	20	0,064±0,002	B	0,084±0,007	D
I-90%	20	0,042±0,002	B	0,054±0,003	D
M-30%	20	0,082±0,007	A	0,063±0,004	C
M-60%	20	0,083±0,003	C	0,043±0,002	C
M-90%	20	0,045±0,002	C	0,032±0,003	D
D-30%	20	0,083±0,009	C	0,065±0,003	C
D-60%	20	0,113±0,005	D	0,052±0,004	B
D-90%	20	0,154±0,005	A	0,081±0,007	A

Estaciones significativamente iguales poseen misma letra (prueba de TUKEY al 95% de confianza). N: 4.

Tabla 27: Resultados de nitrógeno total por Kjeldahl y relación C/N

Estación	Profundidad (cm)	N % 24/05/15	N % 19/07/15	C/N 24/05/15	C/N 19/07/15
I-30%	20	0,021	0,050	54,41	93,15
I-60%	20	0,042	0,041	36,60	42,01
I-90%	20	0,062	0,052	50,91	40,10
M-30%	20	0,062	0,031	35,93	38,84
M-60%	20	0,052	0,042	33,33	51,85
M-90%	20	0,062	0,041	47,90	48,41
D-30%	20	0,051	0,032	32,53	53,78
D-60%	20	0,061	0,051	29,86	69,00
D-90%	20	0,082	0,071	27,11	32,98

N=1

4.2.10 Nitratos y sulfatos

El nitrógeno mineral de los suelos del CC.PP Caca presentó variaciones significativas entre las dos campañas. En la mayoría de las estaciones se observó una disminución

significativa del nitrato debido a su característica de alta movilidad que le permite el transporte en la solución suelo por flujo de masa. De igual forma, el azufre mineral presentó disminución entre las dos campañas debido a que entre valores de pH entre 6 y 6,5 el azufre en forma de sulfato está disponible, y además fue absorbido por las raíces de las plantas.

En general, el nitrato y el sulfato en el CC. PP. Caca varían entre 10 - 123 ppm y 0,08-0,24%, respectivamente alcanzando sus mayores valores en las estaciones M-30% y D-30% para el nitrato, y para el sulfato se obtiene valores muy homogéneos en todos los transeptos verticales como se muestra en la Tabla 28 y Tabla 29 respectivamente.

Los perfiles de las zonas I, M y D presentaron concentraciones de nitratos que aumentaron significativamente al disminuir la longitud altitudinal, excepto la estación D-90%. Indicando que el ión nitrato posee una alta movilidad a lo largo de la longitud altitudinal pero en contenido altos de materia orgánica retiene aniones como el nitrato.

Los perfiles de las zonas I, M y D no presentaron diferencias significativas en la concentraciones de sulfatos a lo largo de la longitud altitudinal, excepto en la estación M-30% observando una pequeña pérdida por baja retención del sulfato en el suelo o absorción a las raíces de los cultivos.

Tabla 28: Resultado de la determinación de nitratos y sulfatos

Estación	Profundidad (cm)	NO ₃ ⁻ (mg/kg) 24/05/15*	NO ₃ ⁻ (mg/kg) 19/07/15*	SO ₄ ⁻² (%) 24/05/15	SO ₄ ⁻² (%) 19/07/15
I-30%	20	55,90±0,45	26,72±0,17	0,15±0,01 ^A	0,15±0,01 ^A
I-60%	20	47,92±0,41	17,84±0,13	0,19±0,03 ^A	0,16±0,01 ^A
I-90%	20	31,79±0,37	12,96±0,12	0,18±0,04 ^A	0,16±0,01 ^A
M-30%	20	109,01±0,61	32,49±0,35	0,10±0,02 ^{AB}	0,08±0,01 ^B
M-60%	20	91,97±0,58	26,18±0,19	0,12±0,03 ^A	0,14±0,03 ^A
M-90%	20	15,43±0,19	10,13±0,11	0,24±0,05 ^A	0,20±0,04 ^A
D-30%	20	123,41±0,78	44,00±0,26	0,14±0,05 ^A	0,16±0,06 ^A
D-60%	20	30,08±0,36	29,22±0,18	0,16±0,05 ^A	0,15±0,06 ^A
D-90%	20	64,18±0,42	56,83±0,35	0,23±0,09 ^A	0,17±0,07 ^A

Estaciones significativamente iguales poseen misma letra (prueba de TUKEY al 95% de confianza). N: 4;*: todas las estaciones poseen grupos diferentes.

4.2.11 Fosfatos y cloruros

El fósforo disponible en los suelos del CC.PP Caca no presentó variaciones significativas entre las dos campañas, presentando una tendencia general a la

disminución, debido a que, a niveles de pH entre 5 y 6.5 el fósforo es poco soluble, formando compuestos como fosfato de aluminio, fosfato de hierro o fosfato de calcio. Además de presentarse la absorción del fósforo en forma de ortofosfato monovalente ($H_2PO_4^-$) por las raíces de los cultivos.

En general, el fosfato y el cloruro en el CC. PP. Caca varían entre 30 - 60 ppm y 1 - 8 ppm respectivamente alcanzando su mayor valor en la estación D-90% para el fosfato, y para el cloruro disponible se observa valores muy heterogéneos en todo los transectos verticales como se muestra la Tabla 29.

Los perfiles de las zonas I, M y D presentaron disminución en las concentraciones de fosfatos al subir la longitud altitudinal indicando que en las partes altas el fósforo fue retenido por el suelo.

Tabla 29: Resultado de la determinación de fosfatos y cloruros.

Estación	Profundidad (cm)	PO ₄ ⁻² (mg/kg) 24/05/15	PO ₄ ⁻² (mg/kg) 19/07/15	Cl ⁻ (mg/kg) 24/05/15*	Cl ⁻ (mg/kg) 19/07/15*
I-30%	20	31,50±0,46 ^E	35,50±1,16 ^E	5,95	1,36
I-60%	20	32,13±0,60 ^{DE}	31,75±0,28 ^{DE}	2,39	6,67
I-90%	20	30,50±2,31 ^D	35,50±1,88 ^D	2,86	1,36
M-30%	20	43,63±1,55 ^C	41,38±1,55 ^C	4,25	1,97
M-60%	20	42,13±1,16 ^C	41,63±0,29 ^C	3,94	1,91
M-90%	20	50,50±1,91 ^B	49,63±0,79 ^B	3,72	1,09
D-30%	20	39,25±0,79 ^E	30,38±0,67 ^E	2,73	2,0
D-60%	20	50,38±1,88 ^B	49,13±1,26 ^B	7,50	3,5
D-90%	20	56,13±1,55 ^A	54,38±1,86 ^A	2,12	2,7

Estaciones significativamente iguales poseen misma letra (prueba de TUKEY al 95% de confianza). N: 4.*: solo se midió dos veces por muestra n: 2.

4.2.12 Micronutrientes

En general, el hierro, cobre y cinc varían entre 130 - 185 ppm ,15 – 64 ppm y 1 - 7 ppm, respectivamente, alcanzando su mayor valor en la estación I-30% para el hierro, M-90% para cobre y cinc. Los resultados de los micronutrientes Fe, Cu y Zn en el CC.PP. Caca se muestran en la Tabla 30.

Tabla 30: Resultados de los micronutrientes.

Estación	Profundidad (cm)	Fe (mg/kg) 24/05/15	Fe (mg/kg) 19/07/15	Cu (mg/kg) 24/05/15	Cu (mg/kg) 19/07/15	Zn (mg/kg) 24/05/15	Zn (mg/kg) 19/07/15
I-30%	20	156,18±2,36 ^E	191,57±3,26 ^A	44,80±2,16 ^F	37,65±1,10 ^A	2,77±0,15 ^N	2,93±0,18 ^N
I-60%	20	151,05±2,15 ^E	176,85±4,25 ^B	34,07±1,98 ^G	15,12±1,30 ^D	3,11±0,29 ^R	4,71±0,52 ^L
I-90%	20	152,55±1,56 ^E	176,44±4,36 ^B	52,08±1,06 ^E	29,60±0,85 ^B	1,71±0,10 ^S	4,78±0,22 ^L
M-30%	20	169,89±2,36 ^E	187,41±3,68 ^A	40,66±2,69 ^F	29,68±1,13 ^B	3,84±0,24 ^Q	5,52±0,31 ^K
M-60%	20	154,33±2,15 ^E	130,89±2,35 ^C	35,83±1,79 ^G	30,69±1,59 ^B	6,91±0,18 ^P	5,79±0,69 ^K
M-90%	20	154,39±3,36 ^E	175,00±2,62 ^B	63,93±1,06 ^D	27,04±2,19 ^B	3,10±0,36 ^M	6,94±0,78 ^J
D-30%	20	164,73±2,56 ^E	185,50±3,15 ^A	43,92±1,37 ^F	22,34±1,86 ^C	2,95±0,21 ^M	3,43±0,56 ^M
D-60%	20	180,41±2,47 ^D	170,49±3,89 ^B	39,21±2,15 ^H	22,97±1,65 ^C	3,67±0,26 ^M	3,42±0,31 ^M
D-90%	20	134,75±2,23 ^F	184,04±4,10 ^A	22,09±1,29 ^I	22,78±1,15 ^C	3,01±0,19 ^Q	5,57±0,71 ^K

Estaciones significativamente iguales le corresponde misma letra -prueba de Tukey al 95% de confianza. N: 4.

4.2.13 Capacidad de intercambio catiónico

La CIC presente en los suelos del CC.PP. Caca está entre 5-15 meq/100g. La estación D-90% presentó un mayor valor respecto a las demás. La CIC en los suelos del CC.PP Caca presentó ligera disminución debido a la menor concentración de los cationes intercambiables (Ca, Mg, K y Na) en la segunda campaña, respecto de la primera.

Los perfiles de las zonas I, M y D presentaron valores de CIC que aumentaron significativamente al subir la longitud altitudinal como se muestra en la Tabla 31.

Tabla 31: Resultados de capacidad de intercambio catiónico en las dos campañas medidas en el laboratorio

Estación	Profundidad	CIC 24/05/15	Comparación 24/05/15	CIC 19/07/15	Comparación 19/07/15
I-30%	20	07,27±0,45	CD	06,15±0,5	CD
I-60%	20	06,82±0,35	D	05,09±0,47	D
I-90%	20	06,75±0,31	D	05,84±0,49	D
M-30%	20	08,48±0,76	C	07,78±0,55	C
M-60%	20	08,02±0,70	C	06,98±0,52	C
M-90%	20	11,29±1,01	B	10,45±0,75	B
D-30%	20	09,39±0,85	C	09,15±0,61	C
D-60%	20	10,09±0,94	B	09,18±0,64	B
D-90%	20	15,00±1,16	A	13,95±0,92	A

Estaciones significativamente iguales poseen misma letra (prueba de TUKEY al 95% de confianza). N: 4.*: solo se midió dos veces por muestra n: 2.

4.2.14 Calcio, magnesio, potasio y sodio intercambiable

El calcio, magnesio, potasio y sodio extraíbles en los suelos del CC.PP Caca presentó una ligera variación. La concentración de los cuatro cationes básicos disminuyó debido a que para valores de pH entre 5 y 6,5 la disponibilidad se reduce y además el calcio, magnesio y potasio son absorbidos por las raíces de las plantas.

En general, Ca, Mg, K y Na en el CC. PP. Caca varía entre 5 - 11 meq/100g, 1 - 3 meq/100g, 0,1 - 1 meq/100g y 0,1 - 0,95 meq/100g respectivamente alcanzando su mayor valor en la estación D-90% para todos los cationes básicos.

Los perfiles de las zonas I, M y D presentaron un aumento significativo en las concentraciones de los cationes básicos al subir la longitud altitudinal indicando que en las partes altas los cationes son retenidos por el suelo. Los resultados de los macronutrientes Ca, Mg, K extraíbles y el elemento Na extraíble con acetato de amonio pH: 7 en el CC.PP. Caca se muestran en la Tabla 32.

4.3 Aseguramiento de la calidad de resultados

El laboratorio debe asegurar la calidad de los resultados de una manera planificada y revisada y debe considerar el uso de esquemas internos de control de calidad y/o control externo según el numeral 5.9 de la Directriz SNA-acr-06D Directriz para la Acreditación de Laboratorios de Ensayo y Calibración [97]. Con el fin de garantizar la calidad de los resultados se debe verificar periódicamente al menos dos parámetros de desempeño como la precisión, veracidad, límite de detección, límite de cuantificación, gráfico de control, participación en pruebas de interlaboratorio y acciones correctivas/correcciones como se muestra en la Tabla 33 y Tabla 34 [97]. Además, se debe verificar la competencia técnica del personal, calibración y verificación de equipos control de las condiciones ambientales. Los problemas de monitoreo de calidad de suelo pueden generar grandes cantidades de datos estos datos pueden ser almacenados y manipulados fácilmente colocando toda la información en una hoja de cálculo o una base de datos computarizada siendo el programa de base de datos como Excel, Minitab, SPSS u otros [97].

Tabla 32: Resultados de los nutrientes Ca, Mg, K y Na extraíbles.

Estaciones	Ca, Mg, k y Na Extraíbles con Acetato de Amonio pH:7							
	Ca 24/05/15	Ca 19/07/15	Mg 24/05/15	Mg 19/07/15	K 24/05/15	K 19/07/15	Na 24/05/15	Na 19/07/15
	meq/100g	meq/100g	meq/100g	meq/100g	meq/100g	meq/100g	meq/100g	meq/100g
I-30%	5,480±0,291 ^E	5,375±0,315 ^E	1,116±0,169 ^G	1,019±0,151 ^G	0,286±0,098 ^L	0,193±0,786 ^M	0,343±0,032 ^N	0,236±0,021 ^O
M-30%	5,117±0,361 ^E	5,015±0,215 ^E	1,145±0,145 ^G	1,054±0,103 ^G	0,229±0,106 ^L	0,187±0,896 ^M	0,331±0,035 ^N	0,224±0,024 ^O
D-30%	5,096±0,326 ^E	4,987±0,198 ^E	1,141±0,298 ^G	1,037±0,156 ^G	0,360±0,105 ^K	0,279±0,0786 ^L	0,333±0,041 ^N	0,259±0,039 ^O
I-60%	6,494±0,415 ^D	6,799±0,319 ^D	1,242±0,240 ^G	1,058±0,123 ^G	0,404±0,110 ^K	0,321±0,0896 ^K	0,346±0,051 ^N	0,311±0,047 ^N
M-60%	6,347±0,426 ^D	6,188±0,369 ^D	1,193±0,257 ^G	0,999±0,592 ^G	0,376±0,108 ^K	0,277±0,0698 ^L	0,300±0,048 ^N	0,335±0,039 ^N
D-60%	8,919±0,391 ^C	8,459±0,419 ^C	1,675±0,205 ^H	1,450±0,692 ^H	0,368±0,107 ^K	0,183±0,0789 ^M	0,386±0,061 ^N	0,272±0,059 ^O
I-90%	7,069±0,398 ^B	7,043±0,319 ^B	1,429±0,243 ^G	1,196±0,785 ^G	0,505±0,109 ^J	0,348±0,089 ^K	0,393±0,058 ^N	0,323±0,068 ^N
M-90%	7,836±0,415 ^B	7,727±0,306 ^B	1,564±0,256 ^G	1,242±0,135 ^H	0,363±0,105 ^K	0,247±0,098 ^L	0,337±0,039 ^N	0,342±0,049 ^N
D-90%	11,083±0,691 ^A	10,583±0,598 ^A	2,651±0,125 ^F	2,422±0,125 ^F	0,948±0,189 ^I	0,821±0,195 ^I	0,324±0,045 ^N	0,323±0,051 ^N

N: 4, (Estaciones significativamente iguales le corresponde misma letra -prueba de Tukey al 95% de confianza),

Tabla 33: Exactitud, límite de cuantificación y detección.

Parámetro	Unidades	Exactitud (recuperación)	Límite de cuantificación	Límite de detección
Densidad aparente	g/cm ³	95,12	-	-
Humedad	%	90,45	-	-
Materia orgánica	%	95,53	0,029	0,012
CIC	meq/100g	94,58	1,534	1,326
Nitrógeno total	%	95,41	0,009	0,001
Fósforo disponible	Mg/	95,23	0,054	0,035
Potasio disponible	ppm	95,23	0,912	0,815
Hierro disponible	ppm	98,23	0,153	0,092
Cobre disponible	ppm	95,5	0,019	0,009
Cinc disponible	ppm	93,20	0,050	0,023
Calcio	ppm	95,268	0,681	0,512
Magnesio	ppm	92,36	0,436	0,342
Sodio	ppm	95,28	0,63	0,40
Sulfato	ppm	91,26	0,661	0,594
Nitrato	ppm	91,26	0,051	0,048

Tabla 34: Aseguramiento y control de calidad de muestreo

Parámetro	Unidades	%PRD (%)	%PRD (%)	Muestra testigo
Densidad aparente	g/cm ³	5,16	6,36	-
Humedad	%	7,15	3,56	-
Materia orgánica	%	3,26	1,29	<5%
CIC	meq/100g	5,36	2,36	<5%
Nitrógeno total	%	2,36	8,23	<5%
Fósforo disponible	Mg/	4,27	0,15	<5%
Potasio disponible	ppm	5,26	3,46	<5%
Hierro disponible	ppm	8,42	5,36	<5%
Cobre disponible	ppm	3,12	6,14	<5%
Cinc disponible	ppm	7,35	5,64	<5%
Calcio	ppm	5,36	4,56	<5%
Magnesio	ppm	4,68	6,48	<5%
Sodio	ppm	3,26	8,26	<5%
Sulfato	ppm	3,69	2,36	<5%
Nitrato	ppm	4,01	4,67	<5%

5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La presente investigación considera que la tecnología de sistema de andenería es el medio más adecuado para el desarrollo agrícola en los andenes si hay un buen manejo de su suelo, mejorando las propiedades físicas, químicas y biológicas, resultando en niveles altos de fertilidad para el crecimiento de los cultivos. Para ello se determinaron que en las estaciones D-90% y M-90 % se han dado buenos manejos de sus suelos como andenes en descanso y andenes con tecnologías de crecimiento vegetativo (Injertos) respectivamente. Mientras, las estaciones I-60% y I-90%, presentaron andenes en abandono y las estaciones M-30%, M-60%, M-90% y D-30% andenes con cultivos de baja productividad.

Estos fueron comparados en función de sus indicadores fisicoquímicos, con los cuales se hicieron análisis estadísticos univariados y multivariados cuyos resultados se discutieron en el siguiente apartado.

5.1 Textura

En los suelos del CC.PP. Caca predominan suelos de textura franco arcillo arenosa considerada ideal para lugares de bajas precipitaciones ya que presenta buena permeabilidad y capacidad de retener la humedad [76,98]. Las estaciones con buen manejo M-90% y D-90 % presentan mayor contenido de arcilla frente a las demás estaciones ya que existe una relación directa entre el contenido de arcilla y las longitudes altitudinales como se mostró en la Tabla 18 y Tabla 19.

5.2 Densidad aparente

La densidad aparente del suelo de la capa arable es uno de los indicadores más usados para caracterizar el estado de compactación de un suelo. En la Figura 34 se observa la tendencia de la densidad aparente a lo largo de los 3 transectos verticales, los valores de la densidad aparente varían entre 1,27 y 1,70 g/cm³ en las dos campañas. Estos valores guardan relación con la textura del suelo y de la materia orgánica. Así, cuanto más gruesa es la textura, las raíces de los cultivos tendrán mayor facilidad para introducirse en los poros del suelo [98,99].

Según los NCS (Niveles de calidad de suelos) tomados de referencia [99]. Los suelos en todas las estaciones presentan una calificación baja, excepto en la estación D-90%. Esto se debe a que contienen un alto porcentaje de arena por lo cual se hacen menos compactos. Estos resultados indican que los suelos con menor calificación se relacionan al constante riego, sobre pastoreo, labranza intensiva y rotación inadecuada de cultivo. Esta degradación de las propiedades de los suelos demanda

ser corregida a través de las prácticas de manejo como labranza mínima, protección del suelo con residuos de cosecha, evitar el tránsito por el terreno, realizar riegos adecuados y planificación de la rotación de cultivos eficientes [99].

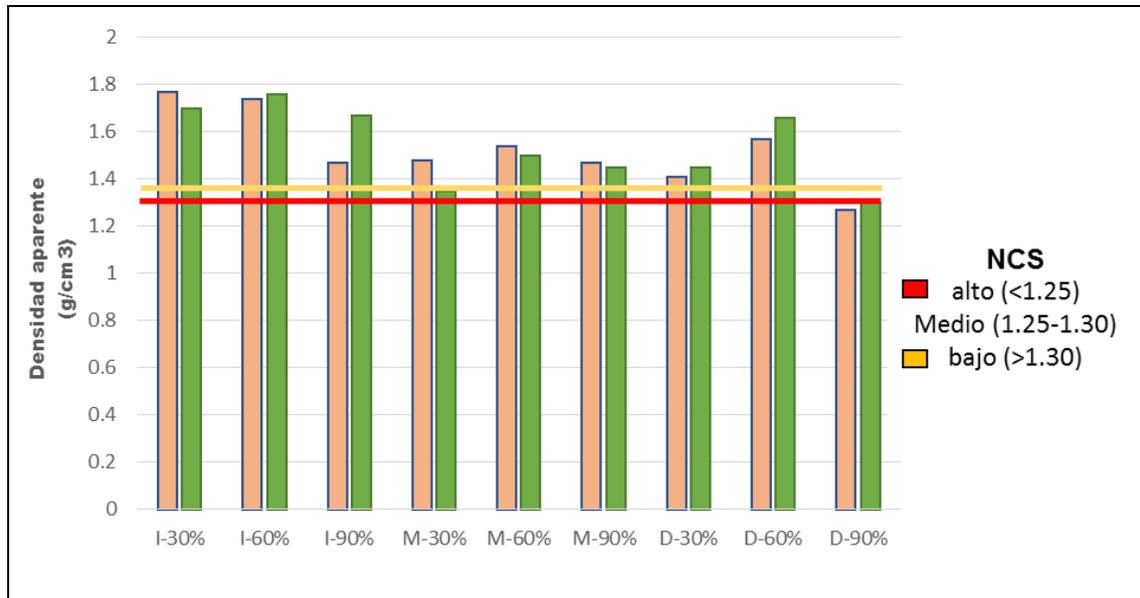


Figura 34: Calificación de la fertilidad con respecto a la densidad aparente.

5.3 pH

En el presente estudio los valores más bajos de pH, tanto en el extracto 1:1 como en la solución salina KCl 1N, fueron registrados en el primer muestreo (mayo) y las más altas en el segundo muestreo (julio), como se muestra en la Figura 35 y Figura 36. Esto se debe a que las variables meteorológicas de temperatura y precipitación influyen en la liberación del aluminio lo que paralelamente trae consigo una reducción en el pH en 5,5 o menos. Además, la acidez tiene su origen en el proceso mediante el cual los minerales sulfurados (por ejemplo, FeS₂) en contacto con la atmósfera, agua y la presencia de ciertas bacterias, pueden favorecer el proceso de oxidación y, por ende, generar la acidez como se muestra en las siguientes ecuaciones [9,100,101].



La acidez del suelo en el CC.PP. de Caca está en el rango de 5,5 a 6,5 lo cual favorece a la mayoría de los cultivos debido a que existe la mayor disponibilidad de los micronutrientes para el desarrollo de las plantas.

La acidez potencial del suelo en el CC.PP. de Caca está en el rango de 5,06 a 5,91 la cual implica un exceso de los micronutrientes existiendo un potencial de toxicidad por aluminio, hierro y manganeso.

Según los niveles de calidad de suelo todas las estaciones presentan una calificación media. Esto se debe a que contiene una adecuada concentración de iones hidronio, excepto la estación M-60% que presenta una calificación baja por la disolución del aluminio [72].

Estos resultados indican que los suelos con menor calificación se caracterizan por la toxicidad de los micronutrientes que interfieren con la división celular, rigidez de las paredes celulares e interacción con nutrientes que disminuyen la productividad de los cultivos [29].

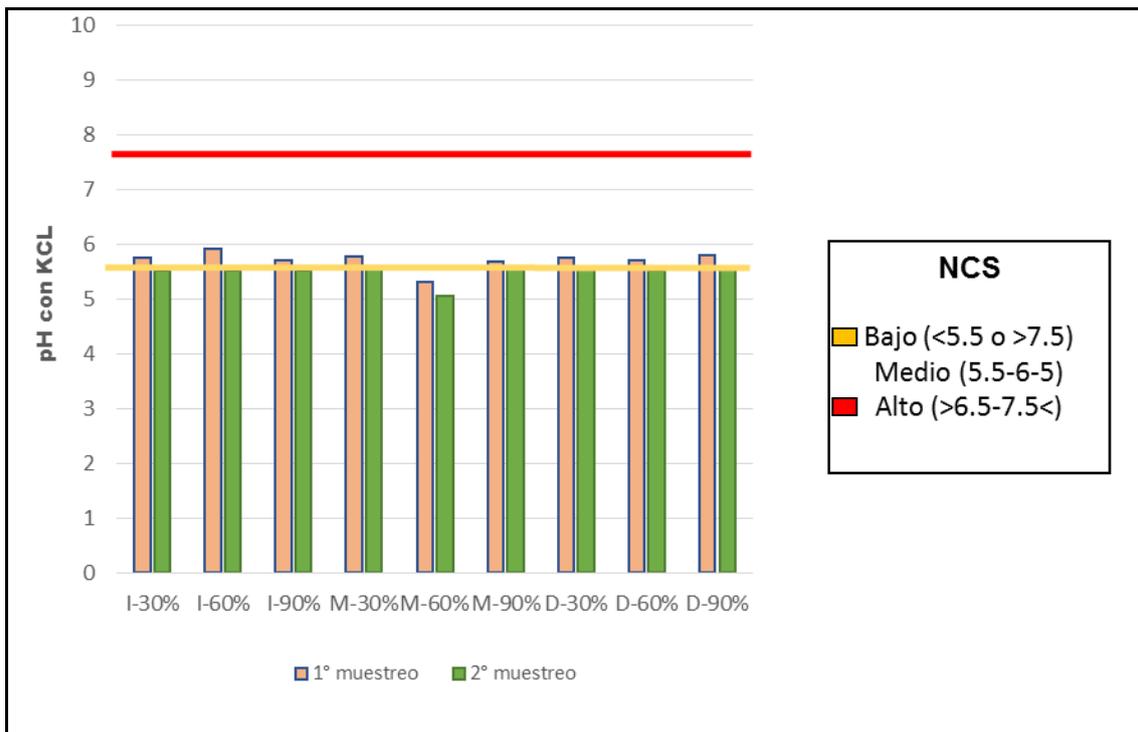


Figura 35: Calificación de la fertilidad con respecto al pH (1:1)

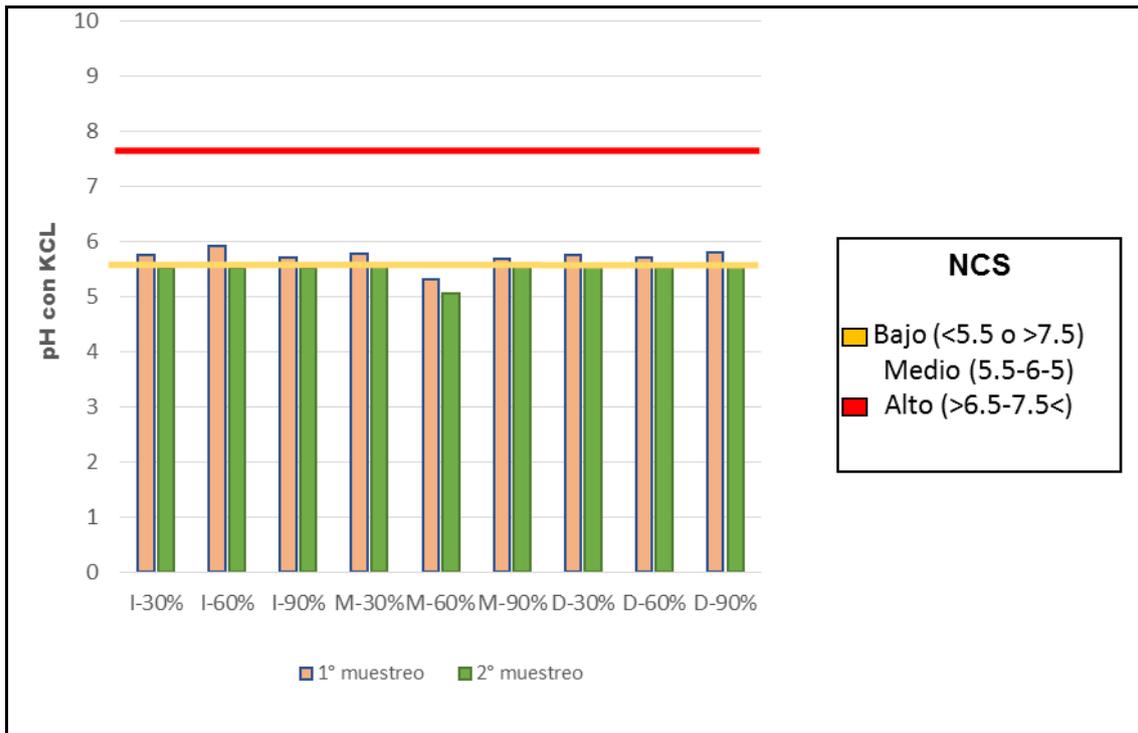


Figura 36: Calificación de la fertilidad con respecto al pH (KCl 1M)

5.4 Conductividad eléctrica y cloruros

Como se puede observar en la Figura 37, la conductividad eléctrica en todas las estaciones es menor a 2 para los dos muestreos realizados. Esto implica que los efectos de la salinidad son nulos y no altera el rendimiento de los cultivos. Entre las sales, el cloruro es un micronutriente que se encuentra entre 1 a 8 ppm como se muestra en la Tabla 29.

Para la evaluación del indicador de salinidad se usará la medida CE estimada para una pasta de saturación ya que los estudios de su clasificación se basan en él. Para el microelemento cloruro no se ha desarrollado niveles críticos hasta la fecha [9].

Según los niveles de calidad de suelos, todas las estaciones presentan una calificación igual a 10. Esto se debe a que contiene bajas cantidades de sales lo que permite una adecuada absorción de la solución suelo en las raíces de los cultivos.

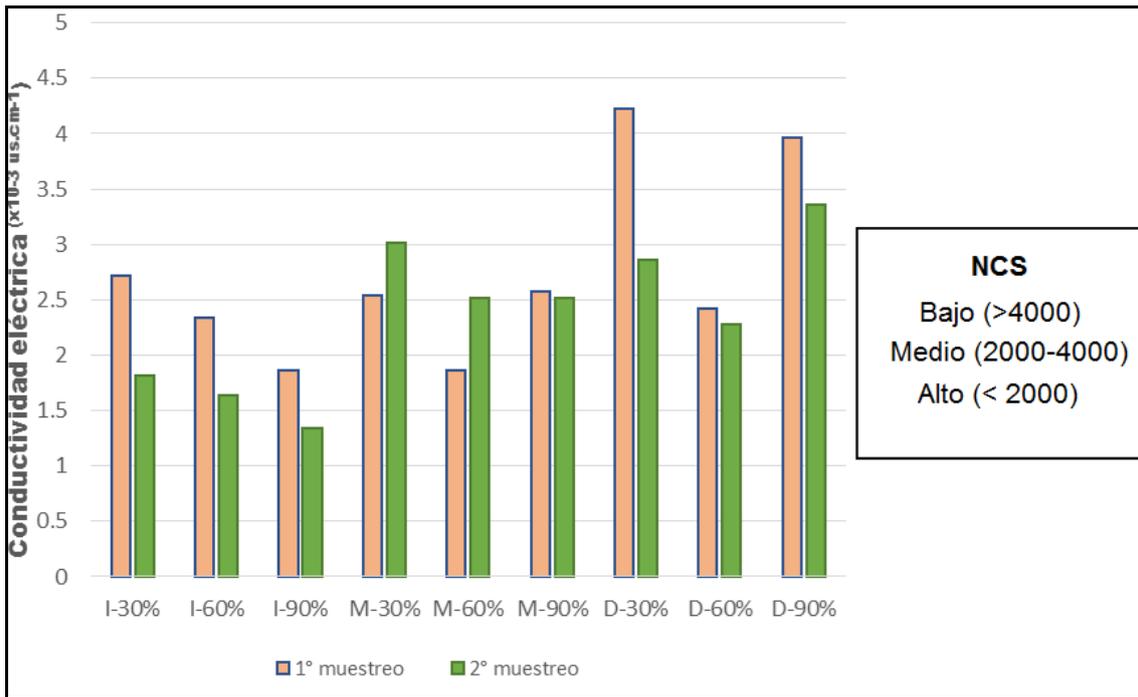


Figura 37: Calificación de la fertilidad con respecto a la CE

5.5 Humedad

La humedad en todas las estaciones está entre 10% y 26% aproximadamente. La retención del agua en el suelo presenta buena correlación con los indicadores de materia orgánica ya que son condiciones dependientes de manejo de suelo como se muestra en la Figura 38 y baja correlación con el porcentaje de arcilla. Esto se debe al gran contenido de materia orgánica que tiene una mayor eficiencia que los coloides inorgánicos [67].

La baja capacidad de almacenamiento de agua en las estaciones I-30%, I-60%, I-90%, M-60% y D-30% se puede deber a las arcillas caoliniticas porque su capacidad de retención es muy baja y su expansión es mínima. Además, los problemas de compactación o contenidos altos de arenas influyen negativamente en la humedad [65].

Las estaciones D-90% y M-90% presentan los mayores valores de humedad con respecto a las demás.

Para la evaluación del indicador de humedad no se obtuvieron niveles de clasificación en bibliografía ya que presenta alta correlación con otros indicadores mostrados en la Figura 38.

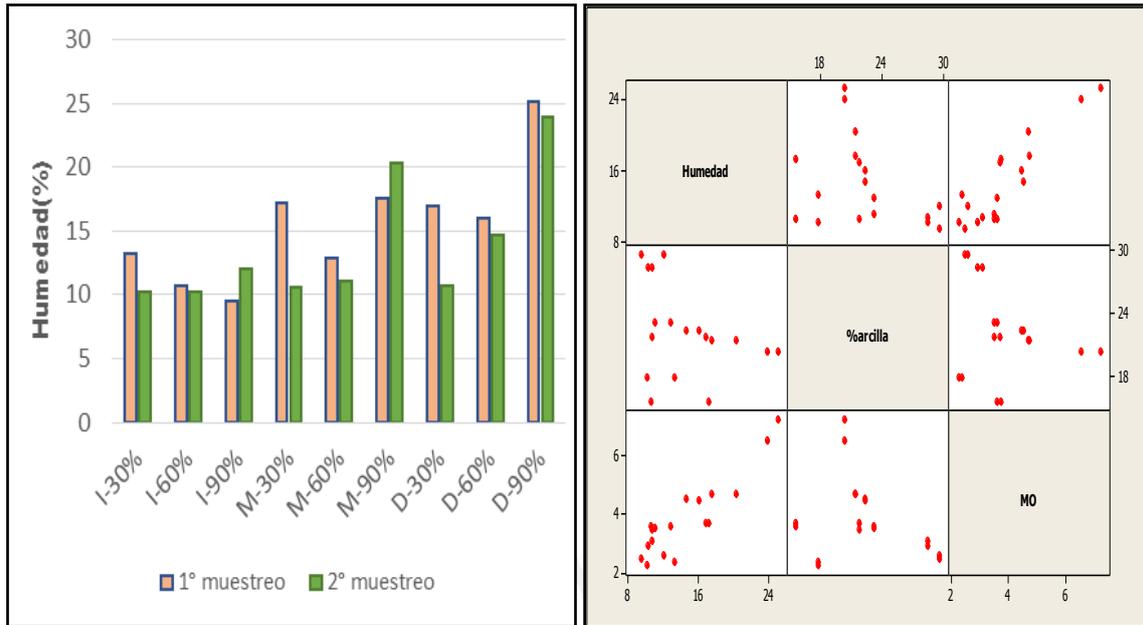


Figura 38: Determinación de humedad y correlación entre arcilla - materia orgánica

5.6 Materia orgánica

La materia orgánica tiene efectos beneficiosos en las propiedades físicas y químicas del suelo ya que aumenta la cantidad de macroporos, con lo que mejora la circulación del aire, Por otro lado, favorece la permeabilidad, buena compactación y circulación del agua al interior del suelo, Estas características están relacionadas con la densidad aparente, es por ello que existe una correlación inversa; es decir, a un menor contenido de materia orgánica, la densidad aparente aumenta como se muestra en la Figura 39 [65].

La cantidad de materia orgánica en la capa arable está entre 2,5% a 7,5%, mostrada en la Figura 40, la cual varía de acuerdo a las condiciones ambientales y disminuyen rápidamente con la profundidad. Este contenido de MO es variable y está condicionado por el clima y la vegetación principalmente, pero a nivel local está determinado principalmente por la fisiografía y el manejo agrícola [2].

Las estaciones D-90% y M-90% presentan los mayores valores respecto a las demás debido al buen manejo del suelo, la aplicación de abono orgánico natural y el descanso anual de sus andenes. Además, a estas elevadas altitudes las temperaturas son bajas lo que retarda la descomposición de materia orgánica haciendo que se acumule en la capa arable, lo que se corrobora un valor de C/N de 32,98 y 48,41 lo

cual significa baja disponibilidad de nitrógeno total en el suelo como se muestra en la Tabla 27 [70].

Para la evaluación del indicador de materia orgánica se usa la clasificación de materia orgánica en el suelo. Según estos niveles de calidad todas las estaciones presentan una calificación media, excepto la estación D-90% que presenta una calificación de alta. Estos resultados indican que es necesario adicionar mayor cantidad de abono orgánico para aumentar el nivel de materia orgánica en las estaciones I-30%, I-60%, I-90%, M-30%, M-60% y D-30%.

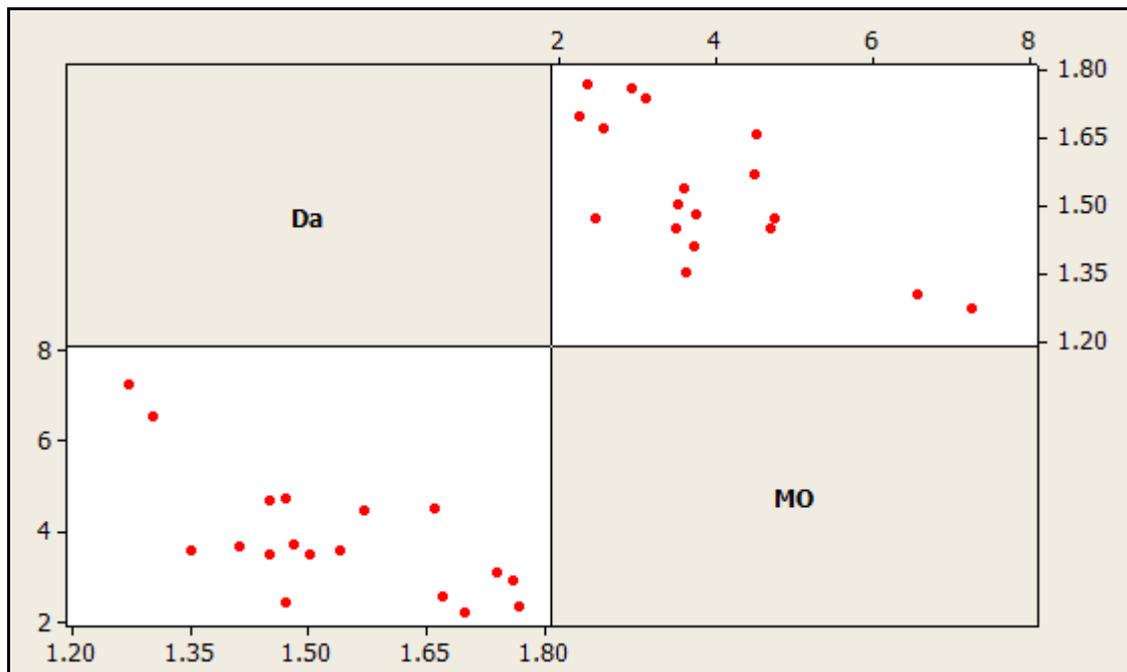


Figura 39: Correlación entre la Materia orgánica y densidad aparente

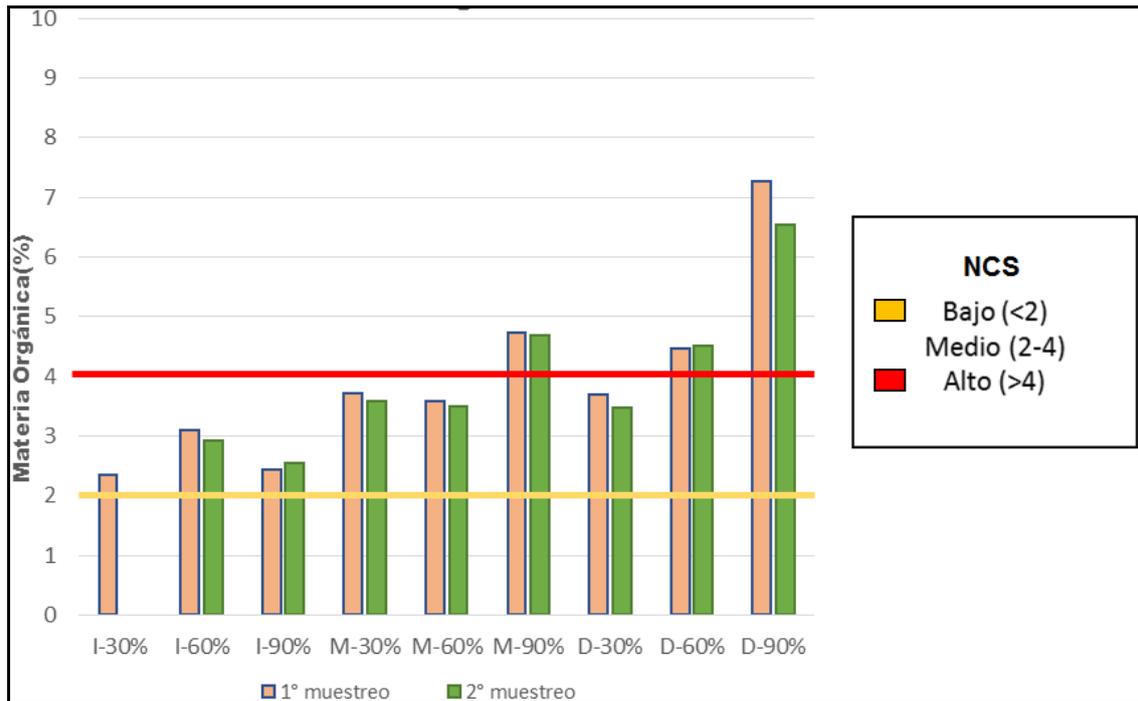


Figura 40: Calificación de la fertilidad con MO

5.7 Nitrógeno total y mineral

La concentración de nitrógeno total en el CC.PP. de Caca varía entre 0,2% - 0,15% como se muestra en la Figura 41. Los valores bajos (< 0.1%) se deben a la baja cantidad de aportaciones en el abonado y baja liberación del nitrógeno en la descomposición de la materia orgánica. La materia orgánica se relaciona con el nitrógeno total debido a que contiene compuestos nitrogenados como proteínas y aminoácidos [70]. Además, los suelos con climas semiáridos mesotermal tienen una relación inversa entre el contenido de nitrógeno y la temperatura, mientras que la relación es directa con las condiciones de pluviosidad [102].

La velocidad de descomposición de los restos orgánicos del suelo depende de su composición química y de las condiciones predominantes en el medio edáfico, factores que influyen y son determinantes en la actividad de los microorganismos. Depende de factores externos como la cantidad de materia orgánica, la temperatura, la humedad, el pH, la profundidad y la aeración. Estos influyen en la disponibilidad de oxígeno, nutrientes inorgánicos y accesibilidad al sustrato que son factores que afectan el metabolismo como actividad y crecimiento microbial [49].

El nitrógeno mineral en el CC.PP. de Caca está entre 10 ppm - 123 ppm. Estas concentraciones varían en relación inversa a la altitud debido al movimiento por difusión de nitrato en el suelo que le genera una alta movilidad en épocas de alta precipitación [103]. Este comportamiento sucede en todas las estaciones, excepto en la

estación D-90% que presenta un alto contenido de materia orgánica mostrados en la Figura 42.

Para la evaluación del indicador de materia orgánica se usa la clasificación de nitrógeno total en el suelo. Según los niveles de calidad de suelo todas las estaciones presentan una calificación igualmente baja como se muestra en la. Por lo tanto, requieren un proceso de restitución de nitrógeno teniendo en cuenta que la eficiencia de los fertilizantes nitrogenados es baja (41%) y, además, que su pérdida tiene impactos económicos y ambientales negativos.

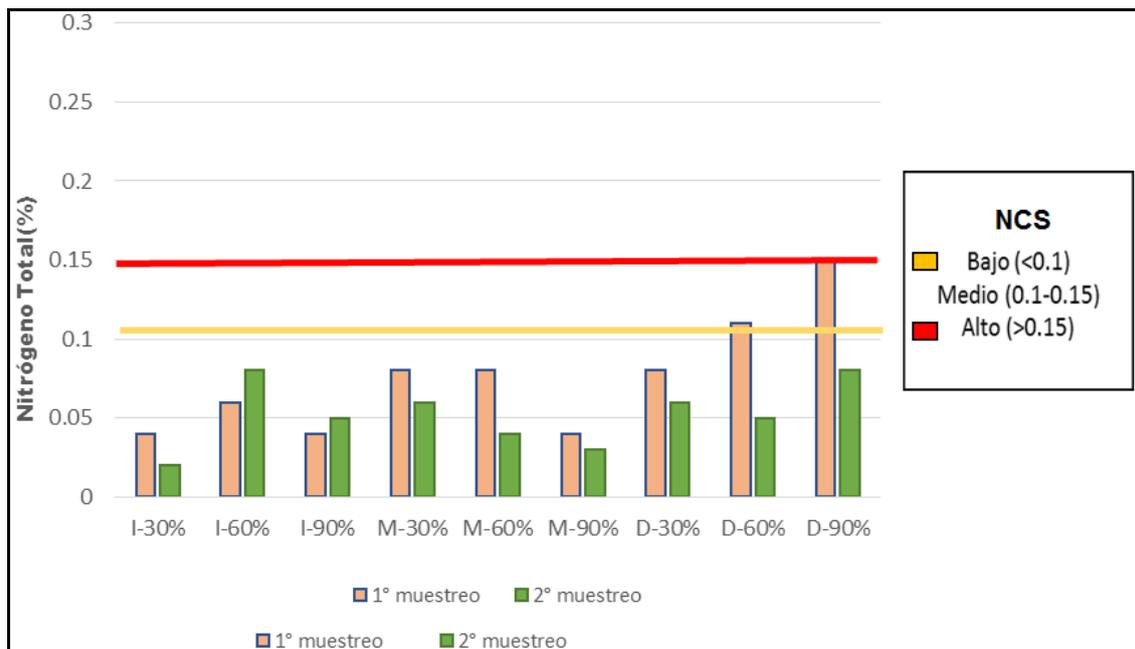


Figura 41: Calificación de la fertilidad con respecto al nitrógeno total.

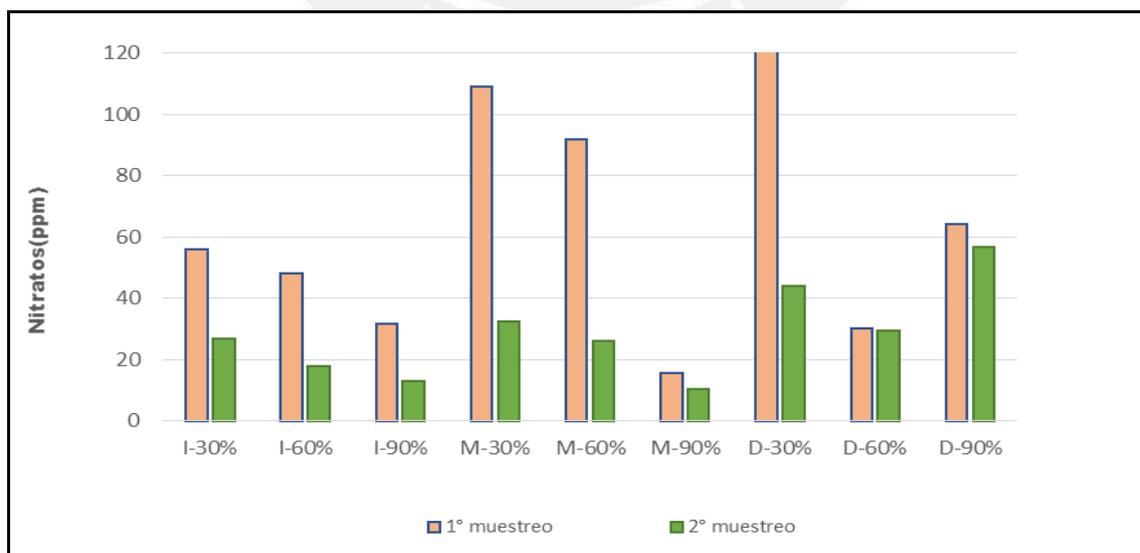


Figura 42: Calificación de la fertilidad con respecto al nitrato

5.8 Fosfatos y sulfatos

La materia orgánica favorece la disponibilidad de los macronutrientes fosfatos y azufre. Para ello, la presencia de materia orgánica en el suelo hace que los iones fosfatados estén libres en la disolución suelo pues, al estar cargada negativamente, sus ácidos orgánicos forman combinaciones complejas con cationes hidroxilados como $Fe(OH)_2$, inmovilizando dichos iones y dejando en libertad los de fósforo [72]. Además, existe una relación inversa entre el contenido de fósforo y la temperatura, mientras que la relación es directa con las condiciones de pluviosidad [93].

A $pH < 5,5$ es menor la disponibilidad de fósforo y azufre como se muestra en la

Figura 3 [29]. En todas las estaciones el pH supera este valor indicando que hay buena disponibilidad de estos dos macronutrientes.

Para la evaluación del indicador de fosfato y sulfato se usan sus niveles críticos [104]. Según los niveles de calidad de suelo, para el fosfato las estaciones presentan una calificación media para las estaciones I-30%, I-60%, I-90%, M-30%, M-60% y D-30% y una calificación alta para las estaciones M-90%, D-60% y D-90% como se muestra en la Figura 43. Para el caso del azufre disponible todas las estaciones presentaron una calificación alta como se observa en la Figura 44.

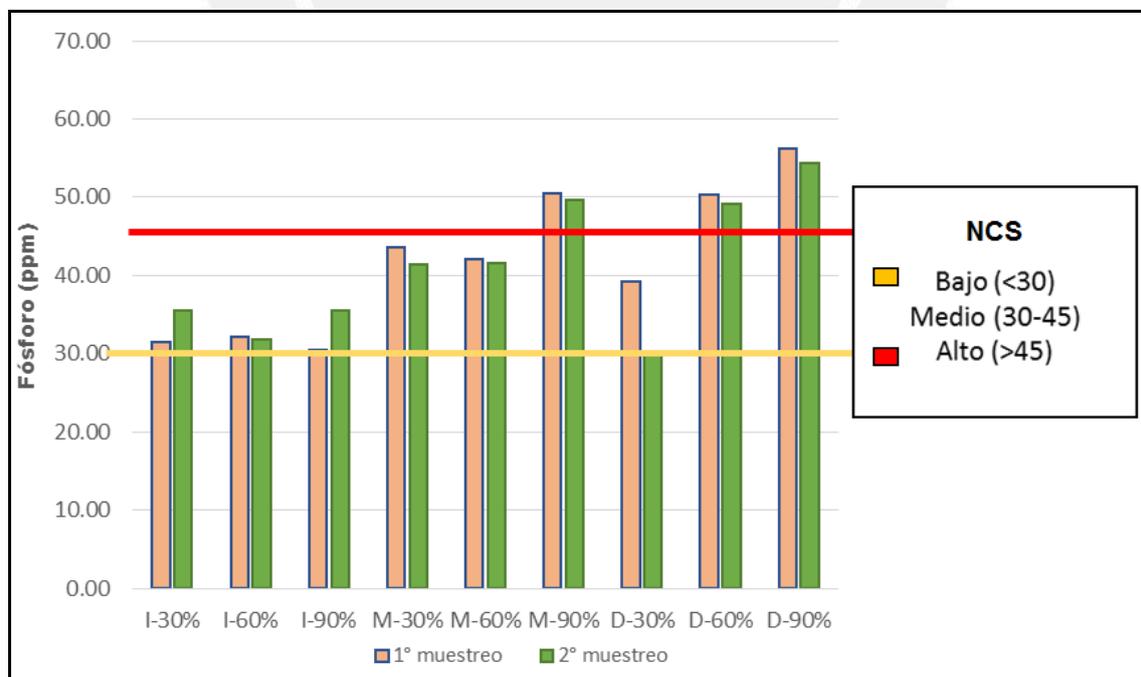


Figura 43: Calificación de la fertilidad con respecto al fósforo

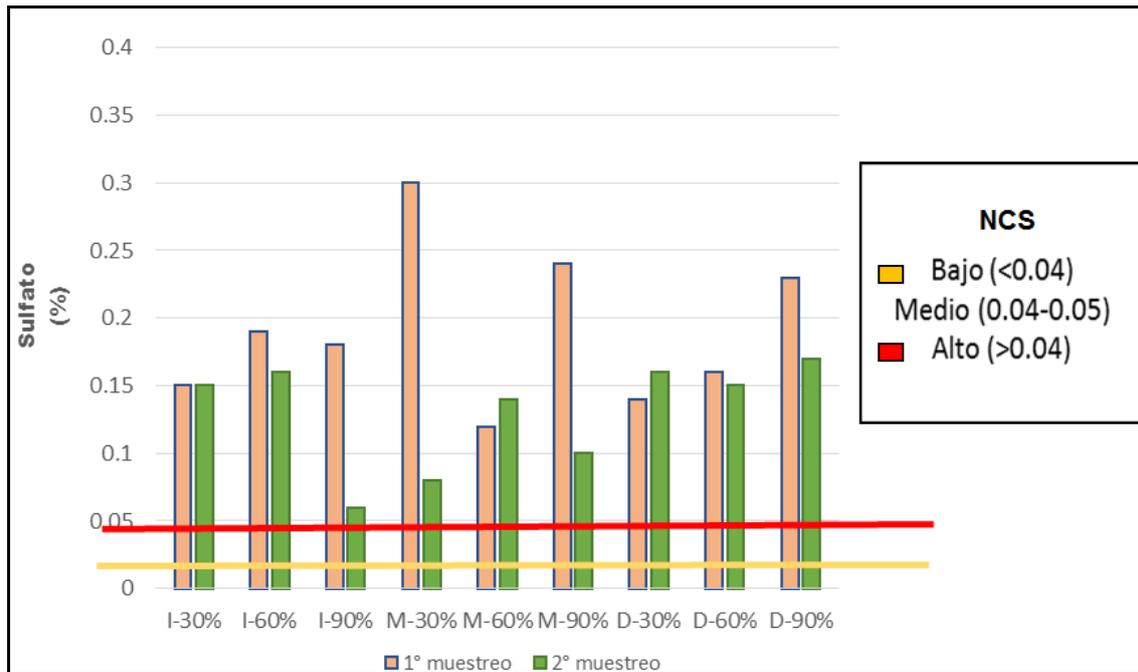


Figura 44: Calificación de la fertilidad con respecto al sulfato

5.9 Micronutrientes

La disponibilidad de micronutrientes para las plantas depende del pH. A pH ácido es mayor la disponibilidad de micronutrientes hierro, cobre y cinc como se muestra en la Figura 3. A $\text{pH} < 7$ empieza a aumentar la disponibilidad de estos microelementos, Además, la materia orgánica al mineralizarse es un suministro de elementos nutritivos de hierro, cobre y cinc. Asimismo, se sabe que los ácidos orgánicos del suelo influyen de manera apreciable en la solubilización y movilización de los micronutrientes [105,106].

Los micronutrientes acumulados en la superficie del suelo se reducen lentamente mediante la lixiviación, el consumo por las plantas, la erosión y la deflación. La materia orgánica guarda correlación directa con los micronutrientes como se muestra en la Figura 45.

Para la evaluación del indicador del hierro, cobre y cinc se usan sus niveles críticos [104]. Según, los niveles de calidad de suelo, la fertilidad de los suelos en relación a los micronutrientes hierro y cobre presentan una calificación alta y una calificación media y alta para el microelemento cinc como se muestra en la Figura 46, Figura 47 y Figura 48 respectivamente.

Se observa altas concentraciones para el microelemento hierro disponible. Esto puede afectar la productividad cuando los micronutrientes están en proporciones iguales a los macroelementos. Además, podría existir un riesgo significativo para la salud de las personas y su ambiente [107].

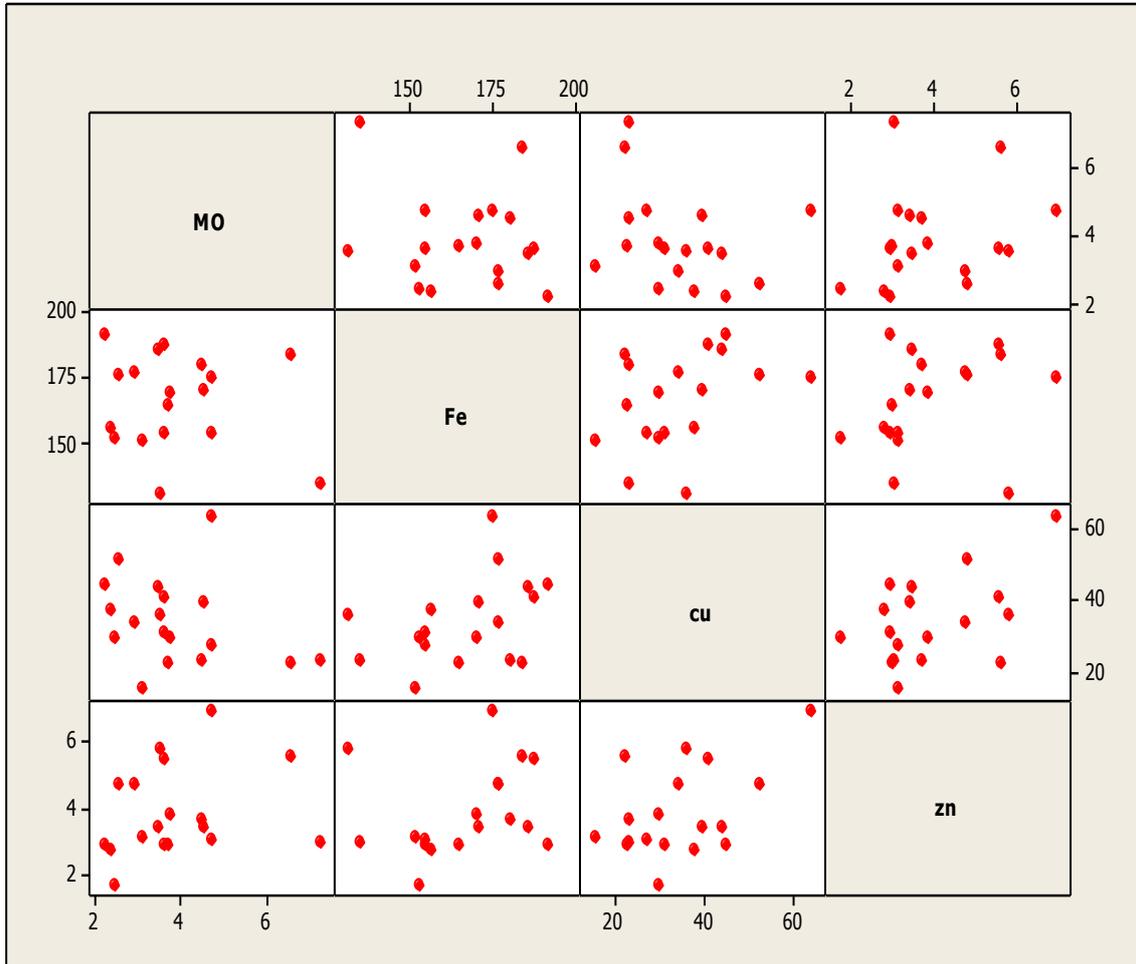


Figura 45: Correlación entre la MO y los micronutrientes disponibles en el suelo.

,

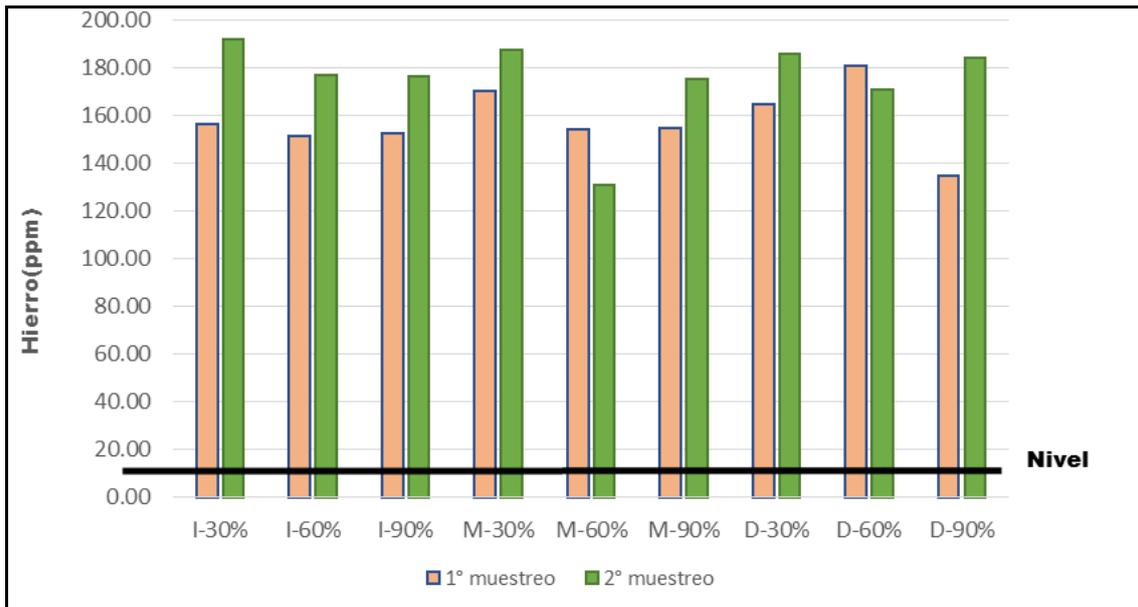


Figura 46: Calificación de la fertilidad con respecto al hierro

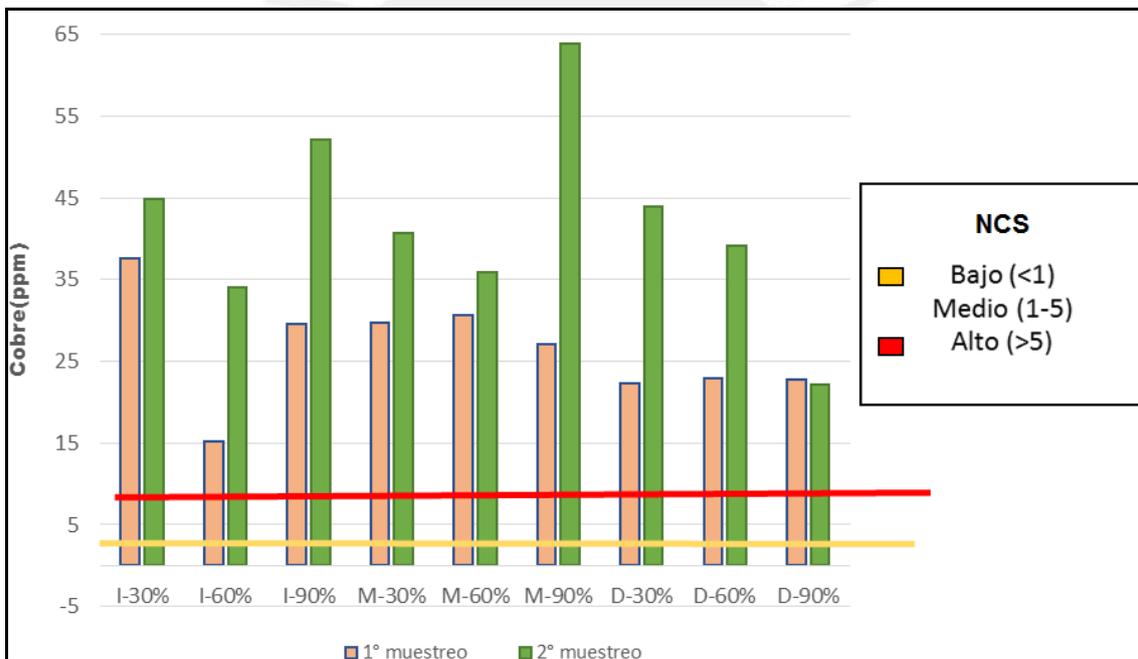


Figura 47: Calificación de la fertilidad con respecto al cobre

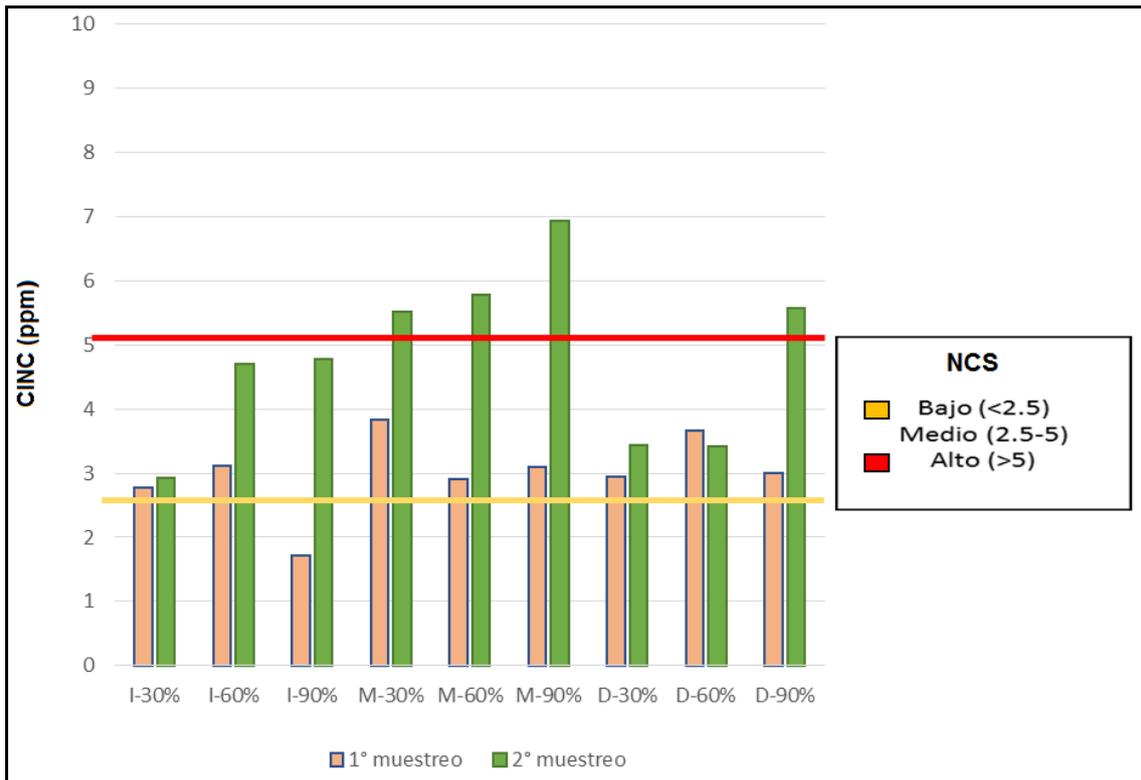


Figura 48: Calificación de la fertilidad con respecto al cinc

5.10 CIC

La CIC presente en los suelos del CC.PP. Caca está entre 5 -15 meq/100g. En la estación D-90%, de buen manejo en sus suelos, presenta un elevado CIC debido a su contenido alto de materia orgánica y cantidad de arcilla [70].

Para la evaluación del indicador CIC se usa su clasificación [101]. Según los niveles de calidad de suelo la fertilidad de los suelos en relación a su CIC presenta una calificación baja y media como se muestra en la Figura 49.

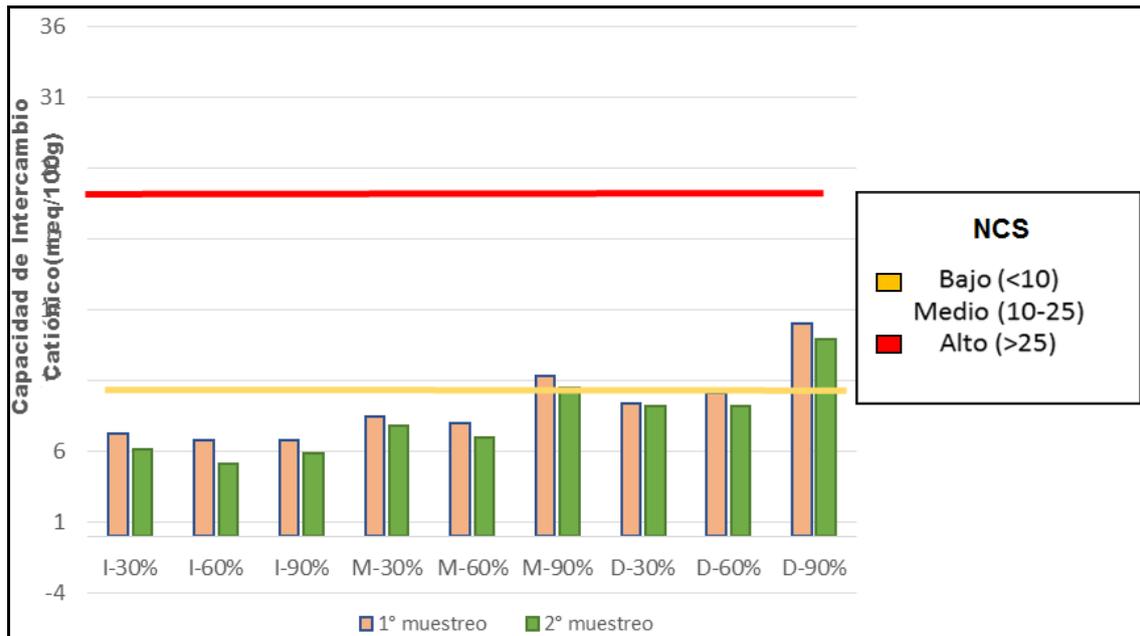


Figura 49: Calificación de la fertilidad con respecto a la CIC

5.11 Calcio, magnesio, potasio y sodio intercambiable

Los cationes intercambiables calcio, magnesio y potasio se encuentran poco disponibles debido al pH del suelo (< 6) [103]. Los elementos calcio y magnesio quedan retenidos fuertemente a los coloides formados es por ello que existe una correlación alta con la materia orgánica, arcilla y CIC. Respecto al potasio, el aporte de la materia orgánica es baja; la mayor parte del potasio se relaciona con la reacción inorgánica del suelo pues proviene de la desintegración y descomposición de rocas compuestas por minerales potásicos [103].

El sodio no es un nutriente en el suelo, pero se considera ya que a concentraciones altas puede generar problemas en la estructura del suelo. Los resultados del porcentaje de saturación de sodio son menores a 15 % en todos los puntos como se puede observar en la Figura 50 indicando que no hay problemas de sodicidad.

Para la evaluación del indicador del calcio, magnesio, potasio se usa sus niveles críticos [101,106]. Según los niveles de calidad de suelo; la fertilidad en relación al calcio intercambiable presenta calificación media y alta. Con respecto al magnesio y potasio intercambiable, presenta una calificación baja y media como se muestran en la Figura 51, Figura 52 y Figura 53 respectivamente.

Para la evaluación del indicador de sodio se usa su nivel crítico de porcentaje de saturación, donde a menor cantidad de sodio, es de buena calidad. Según los niveles de calidad de suelo la fertilidad presenta una calificación alta como se muestra en la

Figura 50. Para la evaluación del indicador del porcentaje de saturación de bases %SB se realiza usando su clasificación, Según los niveles de calidad de suelo la fertilidad en relación al %SB presenta una calificación alta indicando que no hay problemas de bases totales en el suelo como se muestra en la Figura 54.

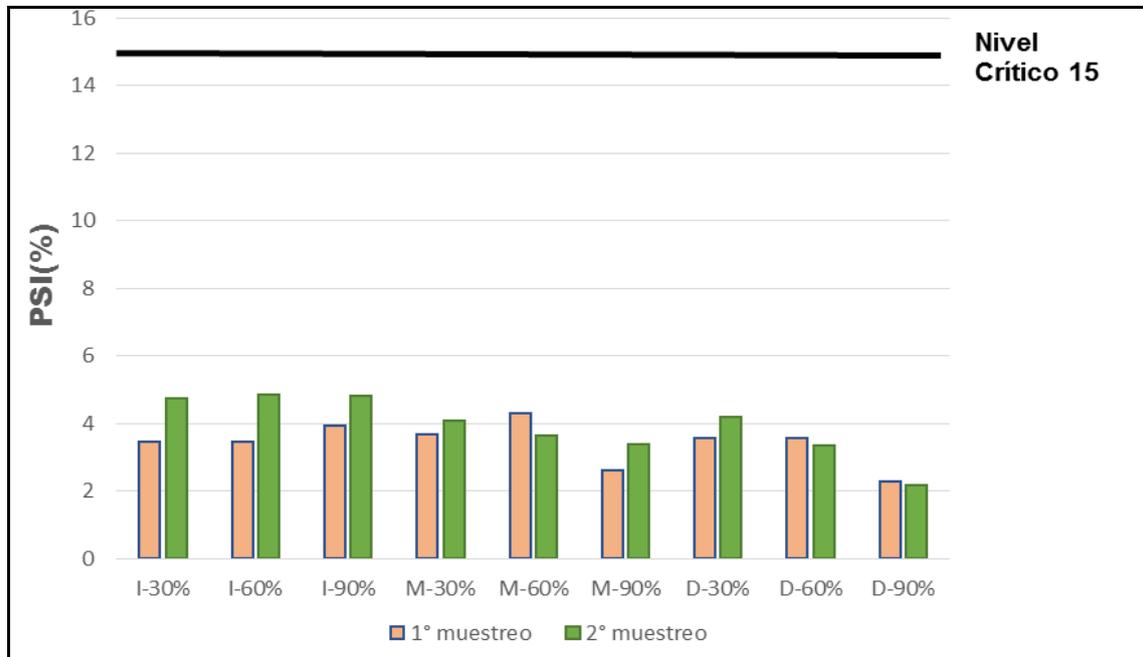


Figura 50: Porcentaje de saturación de sodio

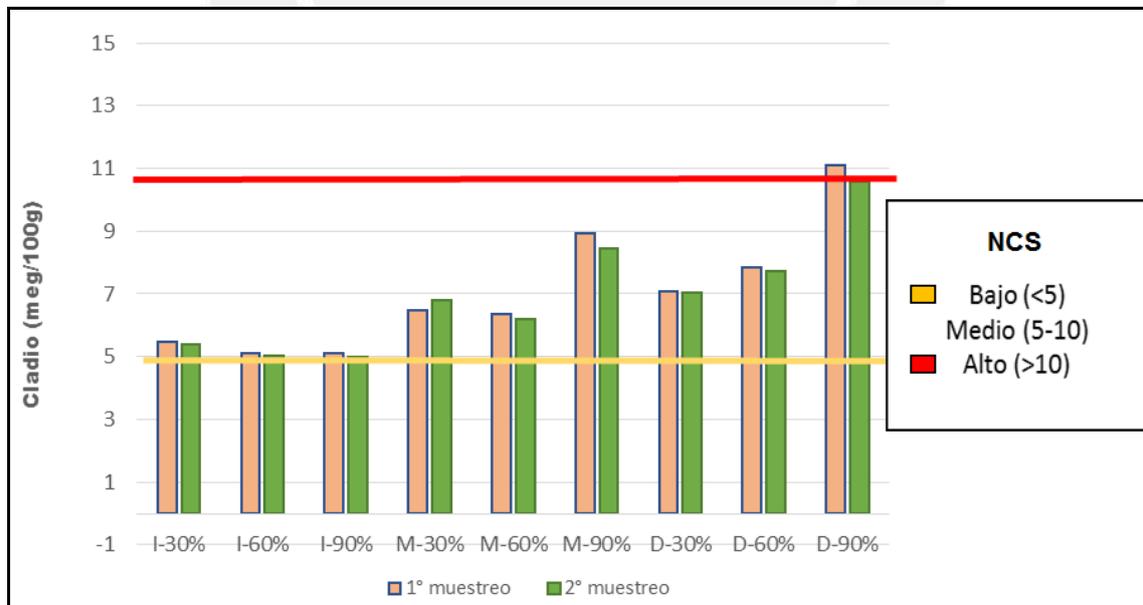


Figura 51: Calificación de la fertilidad con respecto al calcio

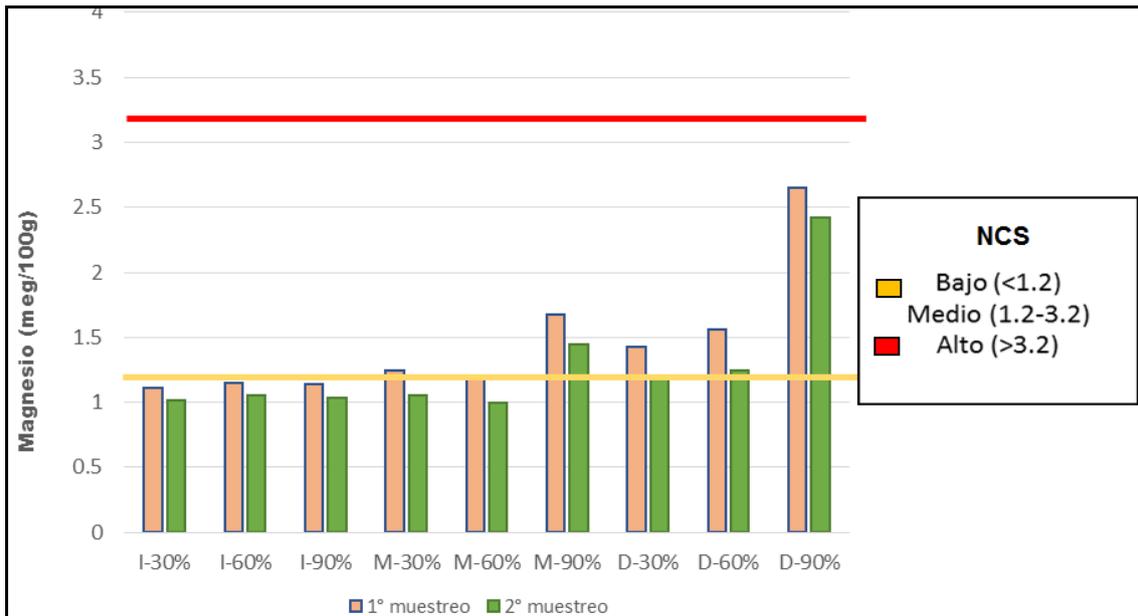


Figura 52: Calificación de la fertilidad con respecto al magnesio

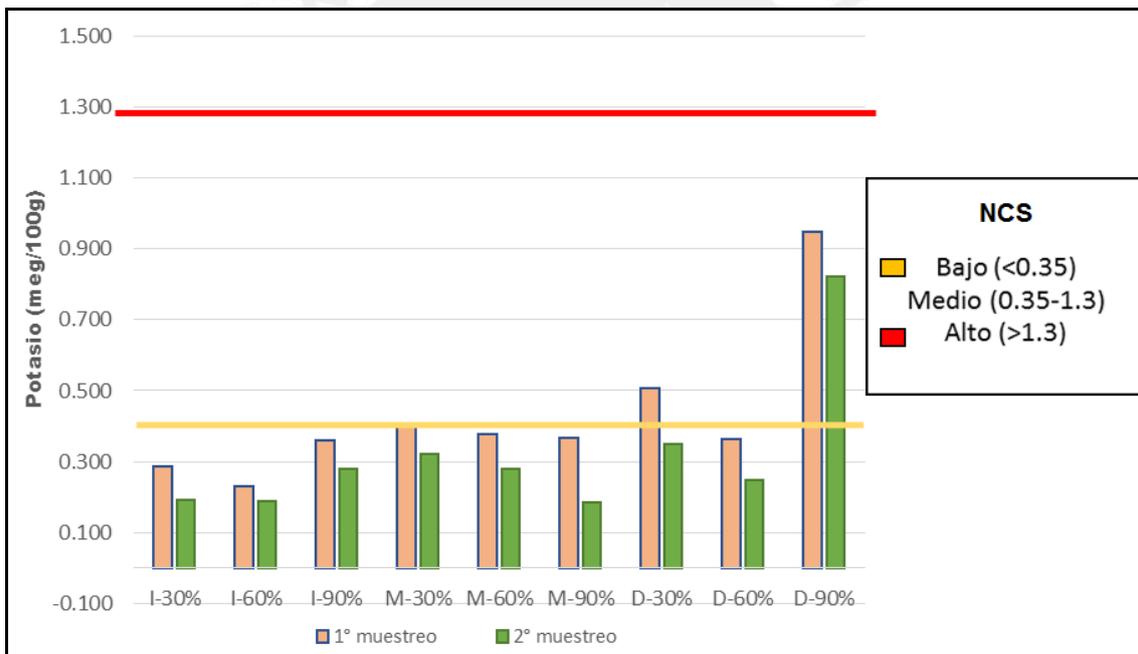


Figura 53: Calificación de la fertilidad con respecto al potasio

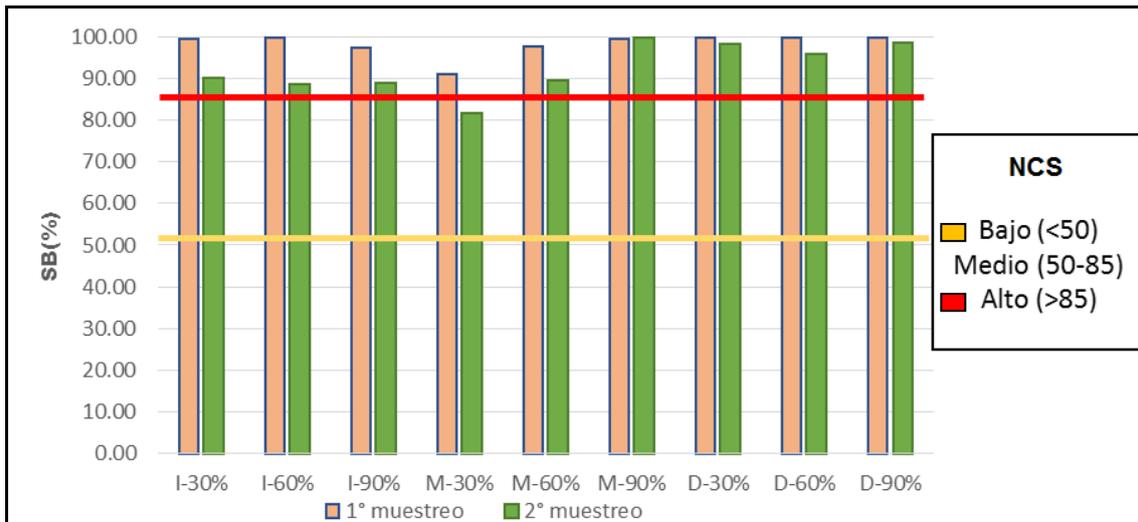


Figura 54: Calificación de la fertilidad con respecto al %SB

5.12 Influencia de los indicadores sobre la fertilidad

Al recabar información en campo por parte de los agricultores se conoció que las zonas con mayor productividad son las estaciones D-90% y M-90% donde se aplica andenes con descanso y tecnologías de crecimiento vegetativo artificial mediante los injertos (consiste en unir dos partes de diferentes plantas, para formar una planta nueva). Considerando los criterios antes mencionados se usan dos variables categóricas que fueron B: bueno para las estaciones D-90% y M-90% y M: Malo para las estaciones I-30%, I-60%, I-90%, M-30%, M-60%, D-30% y D-60%.

Para obtener la selección de los indicadores que permite una gran diferenciación de la fertilidad con respecto al manejo de los suelos, se usa el método quimiométrico de análisis de componentes principales (PCA). Como se observa en la Figura 55 se consideran dos componentes, que logran explicar el 64,7% de la variabilidad de los datos. Además, se observa gráficamente la diferenciación de las observaciones según las etiquetas asignadas (B: Bueno, M: Malo) en base a los criterios de productividad mostradas en la Figura 56.

En la Figura 57 se superponen los gráficos de puntuaciones de las observaciones con las variables que permiten explorar la diferenciación de las zonas.

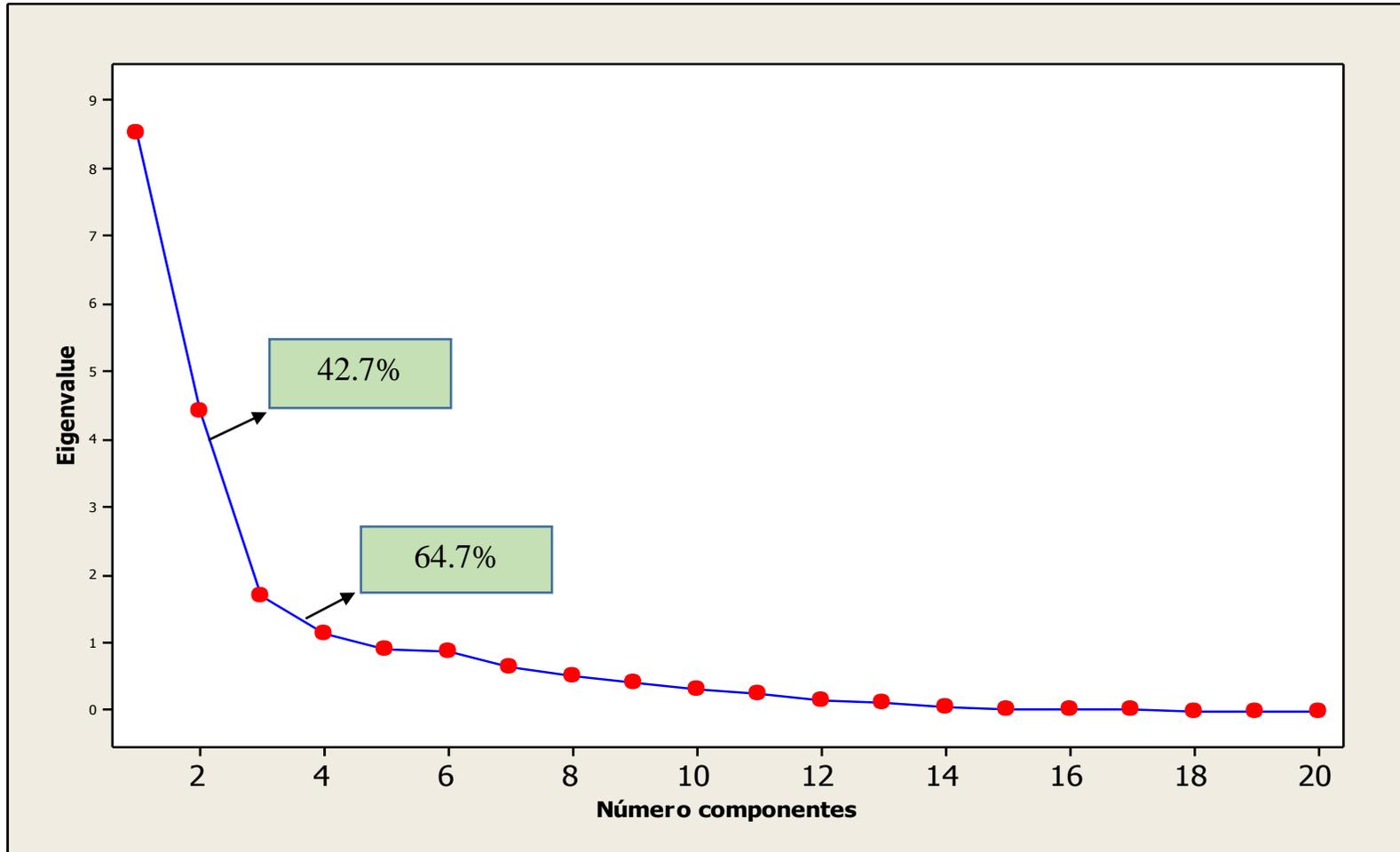


Figura 55: Gráfica de los números de componentes

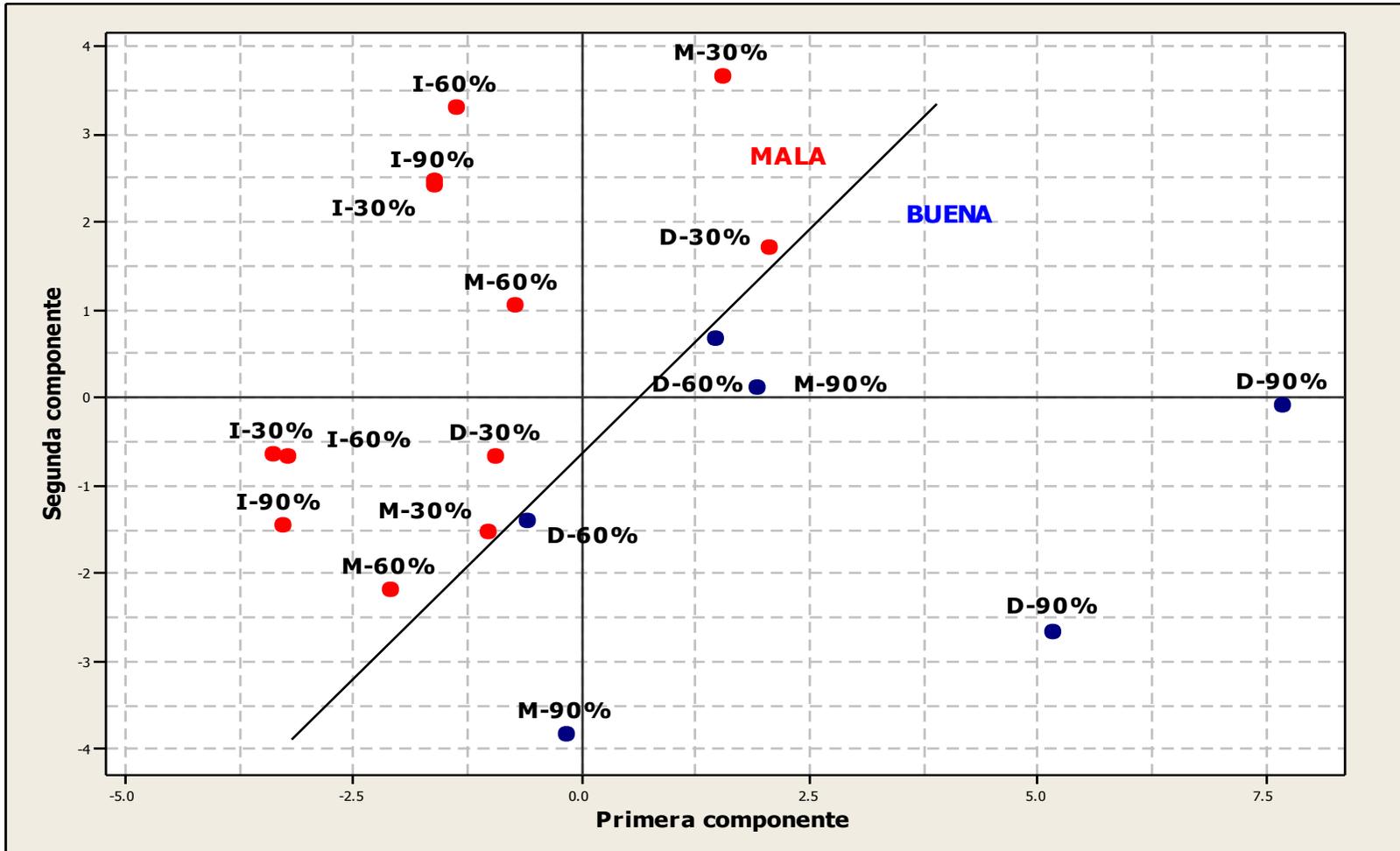


Figura 56: Gráfica de las puntuaciones de las observaciones

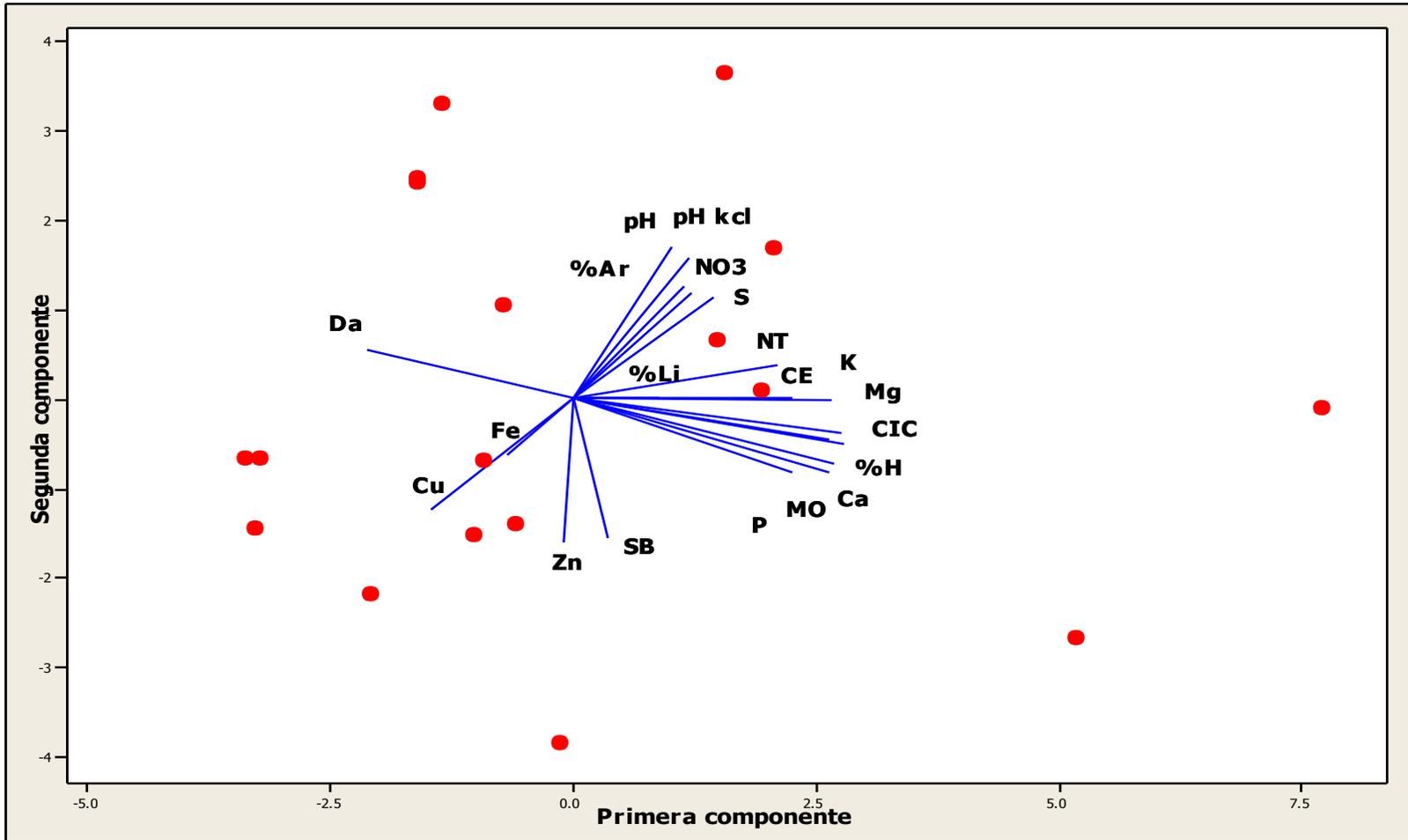


Figura 57: Gráfica bidimensional de la influencia de las variables considerando las puntuaciones de las observaciones

Se corrobora analíticamente lo observado en la Tabla 35 siendo las variables que más influyen: pH, %H (humedad), MO, CIC, Ca (calcio), Mg (magnesio), K (potasio), %SB (saturación de bases) y %a (arena).

Tabla 35: Influencia de las variables sobre la diferenciación de las observaciones

Variable	PC1	PC2	PC3	PC4
DA	-0,251	0,126	0,108	-0,410
pH1	0,137	0,359	-0,298	-0,066
pH2	0,133	0,286	-0,358	-0,321
CE	0,263	0,004	-0,019	0,315
%H	0,309	-0,105	-0,055	-0,095
MO	0,312	-0,165	0,085	-0,096
N	0,244	0,085	0,155	0,072
NO	0,142	0,271	0,040	0,524
P	0,263	-0,188	0,093	-0,142
S	0,169	0,257	0,041	-0,286
Fe	-0,080	-0,144	-0,498	-0,064
Cu	-0,172	-0,280	-0,270	0,044
Zn	-0,013	-0,361	-0,039	0,205
CIC	0,324	-0,112	-0,021	-0,096
Ca	0,307	-0,183	0,007	-0,111
Mg	0,323	-0,086	-0,010	-0,149
K	0,311	-0,003	-0,019	0,165
SB	0,041	-0,350	0,115	-0,304
%a	0,119	0,384	0,167	-0,086
%limo	0,101	0,000	-0,601	0,085

Los Índices de calidad de suelo (ICS) se miden en base a los indicadores seleccionados que permiten explicar la diferenciación de la fertilidad. Para ello, las calificaciones se toman en base a los niveles de calidad de suelos mostrados en la Tabla 36.

Tabla 36: Indicadores fisicoquímicos de la fertilidad de los suelos

Indicador	Niveles	Valor
pH	Bajo (<5,5 o >7,5)	1
	Medio (5,5-6-5)	5
	Alto (>6,5-7,5<)	10
MO	Bajo (<2)	1
	Medio (2-4)	5
	Alto (>4)	10
%Ar	Bajo (<20)	1
	Medio (20-30)	5
	Alto (>30, 50<)	10
Ca	Bajo (<3)	1
	Medio (3-10)	5
	Alto (>10)	10
Mg	Bajo (<1,2)	1
	Medio (1,2-3,2)	5
	Alto (>3,2)	10
K	Bajo (<0,35)	1
	Medio (0,35-1,3)	5
	Alto (>1,3)	10
Zn	Bajo (<2)	1
	Medio (2-5)	5
	Alto (>5)	10
CIC	Bajo (<10)	1
	Medio (10-25)	5
	Alto (>25)	10
SB	Bajo (<50)	1
	Medio (50-85)	5
	Alto (>85)	10

A partir de los resultados de los índices de fertilidad como se muestran en la Tabla 37, Tabla 38 y Tabla 39; la estación D-90% fue la única que superó el umbral de 5. Estos resultados muestran que los suelos de esta estación tienen altos contenidos en MO, pH, % arena, Ca, Mg, K, Zn, CIC y %SB debido al buen manejo de sus suelos con andenes en descanso.

Dado que el nitrógeno es un macronutriente limitante en toda zona de cultivo, debería incluirse al nitrógeno total entre los indicadores fisicoquímicos que influyen positivamente en la productividad de la zona.

Tabla 37: Evaluación de los indicadores de fertilidad para el perfil I

Indicador	I-30%		I-60%		I-90%	
	Respuesta	Calificación	Respuesta	Calificación	Respuesta	Calificación,
pH	5,94	5	5,85	5	5,88	5
MO	2,29	5	3,00	5	2,50	5
%a	1,74	1	1,75	1	1,57	1
Ca	5,43	1	5,07	1	5,04	1
Mg	1,07	1	1,10	1	1,09	1
K	0,24	1	0,21	1	0,32	1
Zn	2,85	5	3,91	5	3,25	5
CIC	6,71	1	5,96	1	6,3	1
SB	94,77	10	94,26	10	93,21	10
	Promedio	3,33	Promedio	3,33	Promedio	3,33

Tabla 38: Evaluación de los indicadores de fertilidad para el perfil M

Indicador	M-30%		M-60%		M-90%	
	Respuesta	Calificación	Respuesta	Calificación	Respuesta	Calificación,
pH	6,14	5	5,64	5	5,89	5
MO	3,66	5	3,54	5	4,71	5
%a	1,42	1	1,52	1	1,46	1
Ca	6,65	5	6,27	5	8,79	5
Mg	1,15	1	1,10	1	1,56	1
K	0,36	1	0,33	1	0,28	1
Zn	4,68	5	4,35	5	5,02	10
CIC	8,13	1	7,50	1	10,87	5
SB	86,29	10	93,56	10	99,67	10
	Promedio	3,78	Promedio	3,78	Promedio	4,78

Tabla 39: Evaluación de los indicadores de fertilidad para el perfil D

Indicador	D-30%		D-60%		D-90%	
	Respuesta	Calificación	Respuesta	Calificación	Respuesta	Calificación,
pH	5,98	5	5,97	5	5,33	5
MO	3,59	9	4,49	8	6,91	6
%a	1,43	1	1,62	1	1,29	5
Ca	7,06	5	7,78	5	10,83	10
Mg	1,31	1	1,4	1	2,54	5
K	0,43	1	0,30	1	0,88	5
Zn	3,19	5	3,55	5	4,29	5
CIC	9,27	1	9,64	1	14,48	5
SB	99,20	10	97,98	10	99,28	10
	Promedio	4,22	Promedio	4,11	Promedio	6,22

Según la clasificación de su capacidad de uso establecido en el DS-017-2009 AG se obtuvo el grupo, clase y subclase de la clasificación de los suelos y sus principales limitantes para la fertilidad como se muestra en la Tabla 40.[27]

Tabla 40: Clasificación de los suelos y sus limitantes de su fertilidad

Estaciones	ICS	Limitantes	Clasificación (DS-017-2009 AG)
I-30%	3,33	Nitrógeno, Calcio, Magnesio, Potasio	C3-A
I-60%	3,33	Nitrógeno, Calcio, Magnesio, Potasio	C3-A
I-90%	3,33	Nitrógeno, Calcio, Magnesio, Potasio , Topografía	C3-A
M-30%	3,78	Nitrógeno, Magnesio, Potasio, Acidez	C3-A
M-60%	3,78	Nitrógeno, Magnesio, Potasio	C3-A
M-90%	4,78	Nitrógeno, Topografía	C2-A
D-30%	4,22	Nitrógeno, Magnesio, Potasio	C3-A
D-60%	4,11	Nitrógeno, Magnesio	C3-A
D-90%	6,22	Nitrógeno	C1-A

Grupo C: Tierras alta para cultivos permanentes, Clase 1: Calidad agrologica alta, Clase 2: Calidad agrológica media, Clase 3; calidad agrológica baja, A: Andenes.

6 CONCLUSIONES

- Los suelos del CC. PP. Caca presentan fertilidad muy variada que depende de las condiciones meteorológicas, de los cultivos, pero en mayor proporción del manejo de conservación de los suelos. Los resultados mostraron que los suelos del CC. PP. Caca presentan propiedades físicas que se encuentran dentro de los niveles medios y altos, indicando una adecuada fertilidad física. Estos parámetros de fertilidad muestran que estos suelos tienen una textura media con buena aireación y retención de la humedad, baja densidad indicando que no hay mucho laboreo en la superficie de la capa arable ni formación de capas duras permitiendo un adecuado medio poroso para el crecimiento normal de las raíces.
- En cuanto a las propiedades químicas, presentan mucha variabilidad y limitaciones en los nutrientes disponibles en el suelo. Estas propiedades varían verticalmente a lo largo de los niveles altitudinales y horizontalmente con los manejos de sus cultivos. Los suelos no presentan problemas ni de salinidad ni sodicidad. Los micronutrientes disponibles (hierro, cobre y cinc) se encuentran en grandes cantidades y los macronutrientes (calcio, magnesio y potasio) en pequeñas proporciones debido a los pH ligeramente y moderadamente ácidos. Los niveles de fósforo y azufre se encuentran entre valores medios y altos siendo liberados por la buena humedad y materia orgánica del suelo. Caso contrario es el nitrógeno que presenta una mayor movilidad y transformaciones que limitan la acumulación en el suelo.
- A partir de los resultados se infiere que las principales limitaciones en el CC. PP. Caca son la acidez potencial que, con el efecto del cambio climático (altas temperaturas y altas precipitaciones) y el mal manejo de los riegos, se va ir agravando generándose un medio rico en aluminio, baja cantidad de cationes básicos (Ca, Mg y K) y niveles bajos de nitrógeno por su alta movilidad, obteniendo bajos rendimientos en los cultivos.
- Los indicadores que influyen en la fertilidad y explican en un 64,7 % su variabilidad son: pH, materia orgánica, porcentaje de arena, calcio, magnesio, potasio, cinc, capacidad de intercambio catiónico y porcentaje de saturación de base.
- Se diseñó y se ejecutó con éxito el plan de monitoreo de suelo en el sistema de andenería del centro poblado, recabando información de los indicadores fisicoquímicos de la calidad de suelo.

- Según el DS-017-2009 AG se clasifican todas las zonas con C3-A, con excepción de la zona M-90% clasificada como C2-A y la zona D-90% que recibe una clasificación de C1-A, que es a su vez la zona con mejores índices de calidad de suelo.
- A partir de los resultados alcanzados, se concluye que la estación D-90% es el que presenta un suelo de mejor fertilidad, sobretodo, por su alto contenido en materia orgánica y su buen manejo de andenes en descanso. Después de un periodo de descanso en barbecho, los suelos habrían recuperado sus nutrientes.



7 RECOMENDACIONES

- Se recomienda en todas las estaciones el manejo adecuado del nitrógeno del suelo a través de la fertilización orgánica e inorgánica en fraccionamientos, mayor cultivo de plantas fijadoras de nitrógeno atmosférico, a fin de lograr un balance adecuado de nitrógeno para la planta.
- Proteger a la estación I-90% con cobertura vegetal para que no se degrade por efecto de la erosión.
- Se recomienda encalar la estación M-30% para minimizar el riesgo potencial de toxicidad por aluminio.
- Para un mejor manejo de conservación de suelos se recomienda incorporar materia orgánica al suelo, cultivando cobertura vegetal, aplicando cultivos asociados y dejando descansar el suelo trabajado para la recuperación de los nutrientes.
- Para una mejor interpretación de los análisis químicos se debe realizar la calibración de los indicadores fósforo extractable, cationes intercambiables azufre extractables y micronutrientes para obtener niveles críticos de acuerdo a la zona de estudio y el cultivo.
- Analizar el efecto del hierro disponible sobre la productividad de los cultivos y analizar el hierro total comparando la norma Canadian Soil Quality Guidelines para determinar si afecta significativamente a la salud de las personas y su ambiente.
- Tener un mayor control con su sistema de riego analizando la cantidad y calidad de sus aguas ya que provienen del manantial LLutana ubicadas en zonas altas a 3470 m s.n.m. con coordenadas WGS84 N= 8585188 y E= 415099.
- Se recomienda continuar con el monitoreo de suelos para recaudar información histórica que se pueda utilizar para la construcción de un modelo de clasificación de tierras la cual permitiría tomar decisiones sobre la selección de tierras que al cultivarse garanticen una buena producción, considerando un conjunto de indicadores fáciles de extraer de los terrenos a evaluar en el CC.PP. de Caca.

8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Sarandón, SJ. El desarrollo y uso de indicadores para evaluar la sustentabilidad de los agroecosistemas. El camino hacia una agricultura sustentable . Ediciones Científicas Americanas. 2002. 393-414 p.
2. García FO. Agricultura sustentable y materia orgánica del suelo: siembra directa, rotaciones y fertilidad. Congreso nacional de la ciencia del suelo. INPOFOS. Santa Cruz de la Sierra, Bolivia; 2003.
3. Charles AF, Butler CF LD. Sustainable agriculture in temperate zones. John Wiley. 1990.
4. Cufre, G. Rodríguez, C. y Pagliaricci H. Sustentabilidad. Introducción a la Producción Animal. FAV UNRC. Buenos Aires, Argentina; 2002. 1-4 p.
5. Díaz B, Cairo P, Rodríguez O, Abreu I, Torres P, Jiménez R, et al. Evaluación de la sostenibilidad del manejo del suelo Pardo con Carbonato (Inceptisol) a través de indicadores de calidad del mismo. Centro Agrícola. 2005. 32 (2):73 p.
6. United Nations Environment Programme(UNEP) /International Soil Reference And Information Centre (ISRIC). World map of the status of human-induced soil degradation. second. Oldeman L, Hakkeling R, Sombroek W, editors. 1991. 29-31 p.
7. Santillana V.N. Producción de biofertilizantes utilizando Pseudomonas sp. Ecología Aplicada. 2006. 5(1,2): 87-91. p.
8. Nuñez M.A. Bases científicas de la agricultura tropical sustentable. Motion Mag. Barinas, Venezuela; 2005.
9. USDA . Soil Quality Test Kit Guide.Washington. D.D: Agricultural Research Service and Natural Resources Conservation Service-Soil Quality Institute. [Internet]. Soil Quality Institute. 1999 [cited 2015 Sep 25]. p. 82. Disponible en : <http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/health/assessment/?cid=st-elprdb1237387>
10. Karlen D, Andrews S, Doran J. Soil quality: Current concepts and applications [Internet]. sciencedirectAdvances in Agronomy. 2001 [cited 2015 Oct 10]. p. 1–40. Disponible en : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0065211301740291>
11. Andrade O, Arrieche I, León M. Diagnóstico de la fertilidad de suelos agrícolas

- en el estado Yaracuy basado en análisis de laboratorio [Internet]. [cited 2015 Oct 15]. Disponible en : http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1044786.pdf
12. Llerena C, Inbar M, Benavides M. Conservación y abandono de andenes [Internet]. 2004 [cited 2015 Nov 1]. p. 51–80. Disponible en : <http://www.lamolina.edu.pe/facultad/forestales/web2007/publicacionesyrevistas/pdf/contenido.pdf>
 13. Inrena. Informe técnico del estudio de inventario y evaluación de andenes. Agricultura M de, editor. Lima, Perú; 1996.
 14. Consorcio para el Desarrollo Sostenible de la Ecoregión Andina (CONDESAN). Recuperación de andenes en la comunidad campesina Barrio Bajo de Matucana provincia Huarochirí [Internet]. 2010 [cited 2015 Sep 20]. Disponible en : http://www.condesan.org/terrazas/sites/default/files/proyecto_recuperacion_de_andenes.pdf
 15. Gobierno Regional de Lima. SNIP 273384 “Recuperación del valor Productivo de los Andenes en los Distritos de Laraos y Carania, provincia de Yauyos Región Lima [Internet]. 2013 [cited 2015 Nov 18]. Disponible en : <http://prensaregionlima.blogspot.com/2013/10/gobierno-regional-de-lima-impulsara-la.html>
 16. Barreda EM, Hollé. M. Los andes y la transformación cultural del paisaje [Internet]. [cited 2015 Nov 17]. Disponible en : <http://www.condesan.org/unesco/Cap 08 Mujica y Holle Los Andes.pdf>
 17. Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales (ONERN). Inventario, evaluación y uso racional de los recursos naturales de la costa, cuenca del Río Cañete. Nacional P book : P gubernamental, editor. Lima, Peru; 1970.
 18. Ministerio de agricultura. Evaluación de la Fertilidad de los Suelos en el Perú. Dirección General de Investigación Agraria, editor. Boletín Técnico N° 78. Lima, Peru; 1973.
 19. Gallegos WA. Evaluación de la Fertilidad de los Suelos de la Costa del Perú. Universidad Nacional Agraria la Molina, editor. Lima, Perú; 1980.
 20. Dercon G, Deckers J, Govers G, Poesen J, Sánchez H, Vanegas R, et al. Spatial variability in soil properties on slow-forming terraces in the Andes region of Ecuador. Soil Tillage Res [Internet]. 2003 Jul;72(1):31–41. Disponible en :

- <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198703000497>
21. Yakabi Bedriñana KS. Estudio de las Propiedades Edáficas que Determinan la Fertilidad del Suelo en el Sistema de Andenería de la Comunidad Campesina San Pedro de Laraos, Provincia de Huarochirí, Lima. Pontífice Universidad Católica del Perú; 2014.
 22. Goodman-Elgar M. Evaluating soil resilience in long-term cultivation: a study of pre-Columbian terraces from the Paca Valley, Peru. *J Archaeol Sci* [Internet]. 2008 Dec;35(12):3072–86. Disponible en : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305440308001271>
 23. Gobierno Regional de Lima. Mapas Temáticos Gerencia Regional de Planeamiento, Presupuesto y acondicionamiento territorial [Internet]. 2007 [cited 2015 Oct 25]. Disponible en : http://www.regionlima.gob.pe/mapas_tematicos.php
 24. Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). Mapa de Pobreza Provincial y Distrital 2009 - El enfoque de la pobreza monetaria. 1a Ed. Lima: OTA-INEI; 2010.
 25. Fernando Volker Puertas Ramos. Índices de Calidad del Suelo y Parámetros de Crecimiento De Cultivos De Cobertura en una Plantación de Cacao.(Theobroma cacao.L.). [Lima, Perú]: Universidad Nacional Agraria la Molina; 2009.
 26. Ampitelli P. 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. [Internet]. *Ciencias del suelo*. 2015 [cited 2015 Sep 15]. p. 223–31. Disponible en : http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-20672010000200010
 27. Ministerio de Agricultura. Reglamento de clasificación de tierras por su capacidad de uso mayor. Decreto supremo. 2009;N°017–2009 – AG.
 28. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). El estado de la inseguridad alimentaria en el mundo 2015 [Internet]. 2015 [cited 2015 May 12]. p. 28–46. Disponible en : www.fao.org/3/a-i4646s.pdf
 29. HAVLIN JL. Soil fertility and fertilizers;an introduction nutrient management. Sadd U, editor. 1999. 499 p.
 30. Roveda G, Peñaranda A. Diagnóstico de la fertilidad química de los suelos de

- los municipios de Granada y Sylvania para la producción de uchuva en Cundinamarca [Internet]. Ciencia y Tecnología. 2012 [cited 2015 Sep 12]. p. 179–88. Disponible en : <http://www.corpoica.org.co/sitioWeb/Archivos/Revista/Cap07.pdf>
31. Darts B. Agricultura sustentable, una perspectiva moderna. Lazcano-Ferrat DI, editor. Informaciones agronómicas Instituto de la potasa y el fósforo (INFOPOS) [Internet]. Norcross Georgia, E. U.A.; 2001 Mar;4(5):1–5. Disponible en : [http://www.ipni.net/ppiweb/iamex.nsf/\\$webindex/bb93473db551592d06256b80005f6abf/\\$file/ia+com+4-5.pdf](http://www.ipni.net/ppiweb/iamex.nsf/$webindex/bb93473db551592d06256b80005f6abf/$file/ia+com+4-5.pdf)
 32. Leytón AA. Fertilidad de Suelos para una Agricultura Sostenible. primera ed. Universidad Nacional Agraria la Molina, editor. Huancayo, Perú; 2003. 226 p.
 33. Edwards C, Lal R, Madden P, Miller R, House G. Sustainable agriculture systems. Soil and Water Conservation Society Ankeny. Soil and Water Conservation Society, editor. Los Angeles, EE.UU; 1990. 696 p.
 34. Eurípedes Malavolta. O futuro da nutrição de plantas tendo em vista aspectos agronômicos, econômicos e ambientais [Internet]. IPNI, editor. 2008 [cited 2015 Oct 15]. p. 121. Disponible en : <http://www.ipni.net/PUBLICATION/IA-BRASIL.NSF/issue/IA-BRASIL-2008-121>
 35. FAO. Development Agenda and the millennium development goals - 14 themes - Sustainable Agriculture [Internet]. 2015 [cited 2015 Nov 19]. p. 1–5. Disponible en : <http://www.fao.org/post-2015-mdg/14-themes/sustainable-agriculture/en/>
 36. Altieri M. Agroecología: Diseñando agroecosistemas diversos y sustentables. REDCAPA, editor. Rio de Janeiro; 1987. 5-12 p.
 37. Cusichaca Trust. Los andenes y su impacto en la agricultura sustentable. Memoria del Seminario Taller, Pampachiri - Andamarca. Ayacucho, Peru; 2015. 13-17 p.
 38. Efraín GO, Trivelli C. Andenes y desarrollo sustentable. [Internet]. IEP / CONDESAN, editor. Lima, Peru; 1999 [cited 2015 Sep 18]. p. 5–25. Disponible en : <http://www.condesan.org/portal/publicaciones/andenes-y-desarrollo-sustentable>
 39. Kendall A, Ouden G den. Terrazas, una Infraestructura Agrícola como Contribución a las Estrategias de manejo de Riesgo Climático [Internet]. Seha, editor. Córdoba, España; 2008 [cited 2015 Oct 20]. p. 1–32. Disponible en :

- http://seha.info/congresos/01_05.pdf
40. Treacy JM. Las chacras de Coporaque. Andenería y riego en el Valle del Colca. Lima, Perú: IEP; 1994.
 41. CEPAL/PNUMA. Estudio de factibilidad de un proyecto nacional de desarrollo en áreas de recuperación de andenes en el Perú. Rev CEPAL. 1989;48–55.
 42. Eguren F, Marapi R. Mesa redonda: Perú, país de andenes. Rescatando el pasado para enfrentar desafíos del futuro. La Revista Agraria [Internet]. Lima, Peru; 2014 [cited 2015 Nov 20];12. Disponible en : <https://es.scribd.com/doc/215980128/Mesa-Redonda-Peru-pais-de-andenes-Rescatando-el-pasado-para-enfrentar-desafios-del-futuro>
 43. Taller Interregional sobre tecnología de andenes y su impacto en la agricultura. conser. Lima, Peru; 2012.
 44. Kendall A, Rodriguez A. Restauración agrícola en los Andes: aspectos socio-económicos de la rehabilitación de terrazas en regiones semi-áridas. Lima, Peru; 2001.
 45. Kendall A, Rodríguez A. Restauración agrícola en los Andes: adaptando los sistemas tradicionales de andenes o terrazas irrigadas en el contexto moderno. 2001. 5-10 p.
 46. Guillet D. Andenes y riego en Lari Valle del Colca. CAPRODA. Lima, Perú; 1990. 1era Edicion.
 47. Anónimo. Suelos vivos. Leisa Rev Agroecol (2)4. 2008;2:4.
 48. Bunch R. El manejo del suelo vivo. 2(Leisa 24):5.
 49. Perales A. Edafología. Huancavelica, Perú: Universidad Nacional de Huancavelica; 2010. 108 p.
 50. Hecht S. La evolución del pensamiento agroecológico. En: Altieri M. Agroecología, bases científicas para una agricultura sostenible. CLADES ACA. La Habana,Cuba.; 1997.
 51. Bartolomé G, Manuel J. Introducción a la agroecología cpomo desarrollo rural sostenible. Reis Revista Española de investigaciones sociológicas, núm95 [Internet]. Madrid,España; 2001;213–7. Disponible en : www.redalyc.org/articulo.oa?id=99717904009

52. Narváez KA, Peñafiel VL, Franco JC. Pérdida de suelo por erosión hídrica en diferentes sistemas de producción con papa *Solanum tuberosum* L. Rev Ciencias Agrícolas [Internet]. 2011;28(1):64–72. Disponible en : <http://revistas.udenar.edu.co/index.php/index/index>
53. Gliessman SR. Ecological processes in Sustainable agriculture. Arbor A, editor. EE.UU; 1997. 5-30 p.
54. Magdoff. Calidad y manejo del suelo agroecología cap16 Bases científicas para una agricultura sustentable. Editorial Nordan. Comunidad. Montevideo; 1999.
55. Larson, W and Pierce F. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. Soil Scien. 1994. 677: 37-51. p.
56. He, Z., Yang, X., Baligar, V.C. and Calvert DV. Microbiological and biochemical indexing systems for assessing quality of acid soils. Adv. Agron. 2003. 89-138 p.
57. Doran J, Parkin T. Defining and assessing soil quality. In: Madison:SSS, editor. Defining soil quality for a sustainable environment. 1994. p. 3–21.
58. Hellin J. De erosión de suelos a suelos de calidad. Leisa Rev Agroecol. 2004;19(4):4.
59. Cruz a B, Barra JE, Castillo RF, Gutiérrez C. La calidad del suelo y sus indicadores. Evaluation. 2004;13(2):90–7.
60. Martínez E, Rodríguez A, Soledad M. Fertilidad del suelo y parámetros que la definen [Internet]. 2014 [cited 2015 Aug 15]. Disponible en : <http://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=267902&info=resumen&idioma=SPA>
61. FAO. Fertilidad del suelo. Conservación de los recursos naturales para una agricultura sostenible [Internet]. 2002 [cited 2015 Aug 24]. Disponible en : http://www.fao.org/ag/ca/training_materials/cd27-spanish/sf/soil_fertility.pdf
62. Lutens AP, Lea JCS. Guía para la Evaluación de la Calidad y Salud del Suelo [Internet]. NRCS-USDA, editor. 1999 [cited 2015 Jul 10]. Disponible en : http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1044790.pdf
63. FAO. Guía para la descripción de suelos. cuarta. Organización de las Naciones unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia; 2009. 33 p.
64. United States Department of Agriculture. Soil Quality Indicator Sheets the Natural Resources Conservation Service.

65. Porta J. ML-A y CR. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Tercera edición. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. 930 pp.
66. U.S. Dept. Agriculture Handbook 18-Soil Survey Manual. Munsell soil color charts [Internet]. Macbeth Division of Kollmargen, editor. 1994 [cited 2015 Dec 20]. p. 30. Disponible en : <http://www.masterplan.southsuburbanairport.com/Environmental/pdf2/Part 4 - References/Reference 16 Munsell Color Charts/MunsellColorChart.pdf>
67. Porta J, Reguerín M, Roquero C. EDAFOLOGÍA Para la agricultura y el medio ambiente. tercera. Mundi-Prensa Barcelona, editor. Barcelona. España; 2003.
68. Rodriguez H, Rodriguez J. Métodos de suelos y plantas Criterios de interpretación. Editorial. 2011. 31 p.
69. Nelson RE. Conversion graphs for salts. [Internet]. USDA, SCA PA, editor. Soil Technical Note No2. [cited 2015 Feb 15]. Disponible en : http://www.ars.usda.gov/SP2UserFiles/Place/20360500/pdf_pubs/P1058.pdf
70. Zavaleta GA. "Edafología ,El suelo en relación con la producción." 1° edición. CONCYTEC, editor. Lima, Perú; 1992. 4-30 p.
71. Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA). Guía práctica de la fertilización racional de los cultivos en España [Internet]. 2006 [cited 2015 Dec 11]. p. 67-74. Disponible en : http://www.ruralcat.net/c/document_library/get_file?uuid=4f402d61-c848-4949-b496-7d795853af4c&groupId=10136
72. J. Benton Jones J. Plant Nutrition and Soil Fertility Manual. Second Edi. 2012.
73. Vivas J, Ocsa Z. Caca tierra de hombres valientes. 1a ed. lima; 2010.
74. Reyes W. Historia de los pueblos de Yauyos. 1a ed. lima: R&R; 2002.
75. INGEMMET-GEOCATMIN. Sistema de información geológico catastral minero [Internet]. 2014 [cited 2015 Dec 20]. p. 33. Disponible en : <http://geocatminapp.ingemmet.gob.pe/apps/geocatmin/>
76. Ministerio del Ambiente. Inventario y evaluación del patrimonio natural en la reserva paisajística nor yauyos cochás Lima, Peru. [Internet]. 2010 [cited 2015 Nov 1]. p. 264. Disponible en : <http://www.infoandina.org/es/content/inventario-y-evaluación-del-patrimonio-natural-en-la-reserva-paisajística-nor-yauyos-cocha-0>

77. Autoridad nacional del agua. Inventario evaluación y uso racional de los recursos naturales de la costa cuenca del río cañete realizado en Junio 1970. [Internet]. [cited 2015 Nov 25]. Disponible en : http://www.ana.gob.pe/media/296693/estudio_hidrologico_pisco.pdf
78. Salazar D, Landa TC. Geología de los cuadrángulos de Mala, Lunahuaná, Tupe, Conayca, Chincha, Tantará y Castrovirreyna 26-j, 26-k, 26-l, 26-m, 27-k, 27-l, 27-m. [Internet]. Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional, n° 44. [cited 2015 Dec 11]. Disponible en : <http://bibliotecavirtual.ingemmet.gob.pe:84/xmlui/handle/123456789/2797>
79. INGEMMET. Estudio Geodinamico de la Cuenca del Rio Cañete. Lima, Peru; 1985.
80. Strahler AN. Geología Física. Tercera. OMEGA, editor. Barcelona. España; 1997. 648 p.
81. Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). Dirección Técnica de Demografía e Indicadores Sociales Mapa de Pobreza Provincial y Distrital. 2009.
82. INEI. Censos Nacionales 2007:XI de poblacion y VI de vivienda - Perfil sociodemográfico de la Región Lima. 1a Ed. lima: OTA-INEI; 2009.
83. Anónimo. Comunicación personal .Pobladores del CC.PP. Caca. 2015.
84. Instituto Nacional de Normalización. Suelos-Muestreo para análisis de fertilidad. NCh2060. 1-9 p.
85. Centro de Investigación y Extensión Forestal Andino Patagónico (CIEFAD). Muestreo de suelos. Criterios básicos [Internet]. Patagonia Forestal. 2004 [cited 2015 Oct 15]. p. 9–12. Disponible en : http://ciefap.org.ar/documentos/fichas/FTA10N1Muestreo_de_suelos.pdf
86. Ministerio del Ambiente.Dirección General de Calidad, Ambiental. MINAM. Guía para el muestreo de suelos en el marco del D.S. N°002-2013. Perú [Internet]. MAVET IMPR. Lima, Perú; 2014 [cited 2015 Nov 1]. p. 9–29. Disponible en : <http://www.minam.gob.pe/calidadambiental/wpcontent/>
87. Ministerio de Agricultura. Manejo Y Fertilidad De suelos. Cadena agroproductica de papa [Internet]. Guia técnica orientada al productor. 2011 [cited 2015 Oct 20]. p. 5–30. Disponible en : <http://agroaldia.minag.gob.pe/biblioteca/download/pdf/manuales->

- boletines/papa/manejoyfertilidaddesuelos.pdf
88. Ministerio del ambiente (MINAM). Guía para el muestreo y análisis de suelos [Internet]. 2000 [cited 2015 Jul 15]. p. 64. Disponible en : <http://www.minam.gob.pe/calidadambiental/wp-content/uploads/sites/22/2013/10/GUIA-PARA-EL-MUESTREO-DE-SUELOS-final.pdf>
 89. APHA-AWWA-WPCF. Standard Methods for the Examination of Water and Wasterwater. Ed 20 ma. NewYork: Water Pollution Control Federation; 1999.
 90. ASTM (D422-63). Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils, 63(Reapproved 2015), 1–8. doi:10.1520/D0422-63R07.2.
 91. ASTM (2013e). Standard Test Methods for Moisture , Ash , and Organic Matter of Peat and Other Organic Soils, 10. doi:10.1520/D2974-07A.2.
 92. ASTM(D2973 - 10e1)Standard Test Method for Total Nitrogen in Peat Materials.
 93. Bortolon L, Gianello C. Interpretação de resultados analíticos de fósforo pelos extratores Mehlich-1 e Mehlich-3 em solos do Rio Grande do Sul. Rev Bras Ciência do Solo. 2008;32(spe):2751–6.
 94. EPA. Method 375.4: sulfate by turbidity. In: Methods for Chemical Analysis of Water and Wastes. 1983.
 95. ASTM(7503)- 10 Standard Test Method for Measuring the Exchange Complex and Cation Exchange Capacity of Inorganic Fine-Grained Soils. p. 1–10.
 96. Sader A, Oliveira S, Berchiellil T. Comparison of Dumas and Kjeldahl methods with automatic analyzers on agricultural samples under routine rapid analysis conditions. Vet Sci. 2004;9(2):73–9.
 97. INACAL. SNA-acr-06D -Directriz para la acreditación de laboratorios de ensayo y calibración NTP ISO/IEC 17025. [Internet]. 2011. p. 1–12. Disponible en : [http://www.inacal.gob.pe/inacal/images/docs/acreditacion/requisitos-para-solicitar-acreditacion/laborarios-ensayo-calibracion/Direc-AcreLabEnsCal\(1\).pdf](http://www.inacal.gob.pe/inacal/images/docs/acreditacion/requisitos-para-solicitar-acreditacion/laborarios-ensayo-calibracion/Direc-AcreLabEnsCal(1).pdf)
 98. MINAG. Dirección General de Competitividad Agraria, editor. Cadena Agroproductiva de Papa. Manejo y Fertilidad de Suelos [Internet]. Lima, Perú; 2011 [cited 2015 Nov 26]. Disponible en : <http://agroaldia.minag.gob.pe/biblioteca/download/pdf/manuales-boletines/papa/manejoyfertilidaddesuelos.pdf>

99. Cuevas J, Dorner J, Ellies S. Elementos de física y mecánica para evaluar la sustentabilidad de suelos agrícolas. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal* [Internet]. Valdivia, Chile; 2004 [cited 2015 Dec 25];4(2):1–13. Disponible en : http://mingaonline.uach.cl/scielo.php?pid=S0718-27912004000200002&script=sci_arttext
100. Campillo R, Sadzawka R. A. Acidificación de los suelos y los procesos involucrados. Programa de recuperación de suelos degradados. Serie Reme. Instituto de investigaciones Agropecuarias CR de IR, editor. Osorno, Chile; 1999. 93-103 p.
101. Villarroel RB. Técnicas de diagnóstico de la fertilidad del suelo, fertilización de praderas, cultivos y mejoramiento de praderas. Inst Investig Agropecu (INIA)–Cent Reg Investig Remehue. SERIE acta.
102. Fassbender H, Bornemisza E. Química del suelo con énfasis en suelos de América Latina. Segunda. San José, Costa Rica IICA; 1987. 420 p.
103. Benton J, Jones J. Plant Nutrition and Soil Fertility Manual. CRC PRESS. 2012. 304 p.
104. Cabalceta G, Molina E. Niveles Críticos De Nutrientes En Suelos De Costa Rica Utilizando La Solución Extractora Mehlich 3. 2006;30(2):31–44.
105. Gregorich, L. J. and Acton, D.F. . Understanding soil health. In: Acton, D. F. and Gregorich, L. J. (Eds). *The health of our soils-towards sustainable agriculture in Canada*. Centre for Land and Biological Resources Research, Research Branch, Agriculture a. 1995;5–10.
106. Jorge ED. Interpretación de los análisis químicos . Laboratorio de Fertilidad de Suelos. Instituto de Recursos Naturales . Colegio de Postgraduados .Campus Montecillo .México.
107. Ángel M, Lenom J, Fuente L, Alberto J, Balderas-plata MÁ, Cajuste LJ, et al. *Agricultural Soils Contaminated by Heavy Metals from a Scrapyard of Discarded Vehicles*. 2013;
108. Jaramillo F. *Introducción a la Ciencia del Suelo*. Universidad Nacional Colombia, editor. Medellín, Colombia; 2002. 559 p.

9 ANEXOS DE LA INVESTIGACIÓN

Anexo 1 Clases texturales del suelo (USDA) y su densidad aparente ideal (g/cm³) [108]

Clase Textural	D,A, (g/cm ³)
Arenosa	1,60 – 1,70
Areno francosa	1,55 – 1,70
Franco arenoso	1,50 – 1,60
Franco	1,45 – 1,55
Franco limoso	1,45 – 1,55
Limoso	1,40 – 1,50
Franco arcillo arenosa	1,45 – 1,55
Franco arcillosa	1,40 – 1,50
Franco arcillo limosa	1,45 – 1,55
Arcillo arenosa	1,35 – 1,45
Arcilla limosa	1,40 – 1,50
Arcilla	1,25 – 1,45

Anexo 2 Calificación del pH del suelo [108]

Valor	Clasificación
<3,5	Ultra ácido
3,5 – 4,4	Extremadamente ácido
4,5, – 5,0	Muy fuertemente ácido
5,1 – 5,5	Fuertemente ácido
5,6 – 6,0	Moderadamente ácido
6,1 – 6,5	Ligeramente ácido
6,6 – 7,3	Neutro
7,4 – 7,8	Ligeramente alcalino
7,9 – 8,4	Moderadamente alcalino
8,5 – 9,0	Fuertemente alcalino
>9,0	Muy fuertemente alcalino

Anexo 3 Calificación del carbonato,[63]

Valor	Clasificación
0	No Calcáreo
0-2%	Ligeramente calcáreo
2-10%	Moderadamente calcáreo
10-25%	Fuertemente calcáreo
>25%	Extremadamente calcáreo

Anexo 4 Clase de salinidad en función de la C,E, del suelo [9]

C,E, (dS/m)	Clasificación
0 – 2	No salino
2 – 4	Muy ligeramente salino
4 – 8	Ligeramente salino
8 – 16	Moderadamente salino
>16	Fuertemente salino

Anexo 5 Contenido de materia orgánica en suelo

Clase	Materia orgánica (%)	
	suelos volcánicos	suelos no volcánicos
Muy bajo	<4	<0,5
bajo	4,1-6	0,6-1,5
Medio	6,1-10,9	1,6-3,5
Alto	11-16	3,6-6
Muy alto	>16,1	>6

Anexo 6 Clasificación de la fertilidad de suelos de acuerdo a la CIC

Clase	CIC (%)
Muy alta	>40
Alta	25-40
Media	15-25
Baja	5-15
Muy baja	<5

Anexo 7 Clasificación de la fertilidad de suelos de acuerdo al nitrógeno total

Clase	Nitrógeno Total (%)
Muy pobre	< 0,05
Pobre	0,05 - 0,10
Medio	0,10 - 0,15
Rico	0,15 - 0,25
Muy rico	>0,25

Anexo 8 Clasificación de la fertilidad de suelos de acuerdo al azufre mineral

Clase	Azufre disponible (ppm)
Bajo	<12
Medio	12- 20
óptimo	20-50
Alto	>50

Anexo 9 clasificación para cationes intercambiables en AcONH_4 pH 7

Clase	Ca	Mg	K
-----meq/100 g -----			
Alta	>10	>3,0	0,6 - 1,3
Media	5 - 10	1,3 - 3,0	0,3 - 0,6
Baja	2 - 15	0,5 - 1,3	0,2 - 0,3
Muy baja	<2	<0,5	<0,2

Anexo 10 Canales de Riego en el sistema de andenería.

