

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**



**“RELACIÓN DE LA TEXTURA DE LOS SUELOS AGRÍCOLAS DE  
LA UNALM CON LOS PARÁMETROS HÍDRICOS UTILIZANDO  
LA OLLA DE RICHARDS”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE  
INGENIERO AGRÍCOLA**

**JESÚS JOEL MAURICIO LOARTE**

**LIMA – PERÚ**

**2022**













## Document Information

---

<b>Analyzed document</b>	TESIS_MAUROCIO_JESUS_2023.pdf (D156148459)
<b>Submitted</b>	2023-01-17 14:40:00
<b>Submitted by</b>	JOSE BERNARDINO ARAPA QUISPE
<b>Submitter email</b>	jarapa@lamolina.edu.pe
<b>Similarity</b>	4%
<b>Analysis address</b>	jarapa.unalm@analysis.orkund.com

## Sources included in the report

---

<b>W</b>	URL: <a href="https://www.madrimasd.org/blogs/universo/2006/07/05/33887">https://www.madrimasd.org/blogs/universo/2006/07/05/33887</a> Fetched: 2023-01-17 14:42:00		5
<b>W</b>	URL: <a href="https://docplayer.es/86368055-Facultad-de-ingenieria-y-ciencias-agropecuarias.html">https://docplayer.es/86368055-Facultad-de-ingenieria-y-ciencias-agropecuarias.html</a> Fetched: 2019-10-25 18:25:53		1
<b>SA</b>	<b>Tesis InfiltracionTroya.docx</b> Document Tesis InfiltracionTroya.docx (D21156078)		1
<b>W</b>	URL: <a href="http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/">http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/</a> Fetched: 2023-01-17 14:42:00		2
<b>SA</b>	<b>Branlyn Teran - Tesis 27.11.2018.docx</b> Document Branlyn Teran - Tesis 27.11.2018.docx (D44719153)		2
<b>W</b>	URL: <a href="https://www.fao.org/3/x0490s/x0490s.pdf">https://www.fao.org/3/x0490s/x0490s.pdf</a> Fetched: 2021-10-16 17:21:52		1
<b>SA</b>	<b>TESIS FINAL.docx</b> Document TESIS FINAL.docx (D40948578)		3
<b>W</b>	URL: <a href="https://www.redalyc.org/pdf/932/93231102008.pdf">https://www.redalyc.org/pdf/932/93231102008.pdf</a> Fetched: 2020-07-25 03:56:23		3
<b>W</b>	URL: <a href="https://www.slideserve.com/herrod-shaw/unidad-iv-fase-l-quida-del-suelo">https://www.slideserve.com/herrod-shaw/unidad-iv-fase-l-quida-del-suelo</a> Fetched: 2023-01-17 14:42:00		1
<b>W</b>	URL: <a href="https://www.academia.edu/23970523/Funciones_De_Pedotransferencia_Para_Estimar_La_Retenci%C3%B3n">https://www.academia.edu/23970523/Funciones_De_Pedotransferencia_Para_Estimar_La_Retenci%C3%B3n</a> Fetched: 2019-10-04 21:26:14		1
<b>SA</b>	<b>Proyecto de Investigacion Troya.docx</b> Document Proyecto de Investigacion Troya.docx (D21687767)		1
<b>SA</b>	<b>TESIS DEFINIT-Vicen-Barc.docx</b> Document TESIS DEFINIT-Vicen-Barc.docx (D29217737)		1

## Entire Document

---

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**

**“RELACIÓN DE LA TEXTURA DE LOS SUELOS AGRÍCOLAS DE  
LA UNALM CON LOS PARÁMETROS HÍDRICOS UTILIZANDO  
LA OLLA DE RICHARDS”**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE:

**INGENIERO AGRÍCOLA**

Presentado por:

**BACH. JESÚS JOEL MAURICIO LOARTE**

Sustentado y aprobado por el siguiente jurado:

Mg. Sc. MIGUEL ÁNGEL SÁNCHEZ DELGADO  
Presidente

Dr. SADY JAVIER GARCÍA BENDEZÚ  
Miembro

Mg. Sc. JAVIER ANTONIO GOICOCHEA RÍOS  
Miembro

Ing. JOSÉ BERNARDINO ARAPA QUISPE  
Asesor

Ing. PABLO LEONARDO QUISPE RAMOS  
Co-Asesor

LIMA – PERÚ

2022

## **DEDICATORIA**

A mis padres Victor y Felicitas y a mi hermana Edith, por su constante apoyo y perseverancia en mi vida personal y universitaria, que me enseñaron a luchar y ser constantes en la vida y sobre todo ser una buena persona.

## **AGRADECIMIENTO**

A mis Padres y hermana por la paciencia y apoyo en la elaboración de este trabajo de investigación, es por ellos que me dan fuerzas para seguir adelante y no decaer ante la adversidad.

A mis tíos y demás familiares por el constante apoyo en mi vida personal para poder afrontar los problemas que trae la vida.

A mi alma mater la Universidad Nacional Agraria La Molina, por todos los años de enseñanza, no solo académicas si no del entender y conocer lo diverso que es el Perú y que me enseñó a ser un buen profesional en base a valores y principios.

A mi asesor el Ingeniero José Arapa Quispe, por la oportunidad de realizar este trabajo de investigación y por ser un amigo que siempre me guió para mejorar en los trabajos y en la vida profesional.

# ÍNDICE GENERAL

<b>RESUMEN .....</b>	<b>vii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>viii</b>
<b>I. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1. Justificación.....	1
1.2. Objetivos .....	2
1.2.1. Objetivo general.....	2
1.2.2. Objetivos específicos .....	2
<b>II. REVISIÓN DE LITERATURA.....</b>	<b>3</b>
2.1. Textura.....	3
2.1.1. Definición .....	3
2.1.2. Determinación de la textura.....	3
2.1.3. Clases texturales .....	6
2.2. Estado energético .....	8
2.2.1. Potencial hídrico .....	8
2.2.2. Medidas del potencial del agua del suelo .....	10
2.3. Contenido del agua en el suelo.....	14
2.3.1. Saturación .....	14
2.3.2. Capacidad de campo .....	14
2.3.3. Punto de marchitamiento .....	14
2.3.4. Agua aprovechable .....	15
2.3.5. Determinación indirecta de la capacidad de campo y el punto de marchitamiento .....	16
2.4. Funciones de edafotransferencia (FET's).....	17
2.4.1. Regresión lineal múltiple.....	18
2.4.2. Validación de las funciones de edafo-transferencia .....	19
<b>III. METODOLOGÍA .....</b>	<b>21</b>
3.1. Zona de estudio .....	21
3.1.1. Ubicación.....	21
3.1.2. Geografía .....	22
3.1.3. Suelos.....	22
3.2. Equipos y materiales .....	22

3.2.1. Equipos de campo y laboratorio .....	22
3.2.2. Equipo de cómputo y Software.....	23
3.2.3. Materiales: .....	23
3.3. Procedimiento.....	23
3.3.1. Fase preliminar .....	24
3.3.2. Fase de campo.....	27
3.3.3. Fase de laboratorio.....	30
3.3.4. Fase de análisis estadístico y formulación de modelo .....	41
<b>IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>48</b>
4.1. Análisis textural.....	48
4.2. Capacidad de campo y punto de marchitez .....	50
4.3. Análisis estadístico .....	52
4.3.1. Estudio descriptivo .....	52
4.3.2. Análisis exploratorio de datos .....	56
4.4. Regresión lineal múltiple.....	58
4.4.1. Supuestos de la regresión lineal múltiple .....	60
4.4.2. Identificación de valores atípicos y observaciones influyentes .....	63
4.4.3. Formulación de las funciones de edafotransferencia (FET) .....	65
4.4.4. Validación de los FET's .....	67
<b>V. CONCLUSIONES.....</b>	<b>69</b>
<b>VI. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>70</b>
<b>VII. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>71</b>
<b>VIII. ANEXOS .....</b>	<b>74</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Clasificación de las partículas de suelo según su tamaño .....	5
Tabla 2: Clases texturales según la cantidad de partículas del tipo de suelo.....	6
Tabla 3: Parámetros hídricos de los suelos en función de su clase textural .....	8
Tabla 4: Ecuaciones de regresión y sus coeficientes de determinación ( $R^2$ ) para estimar el contenido de humedad retenido a Capacidad de campo.....	17
Tabla 5: Ecuaciones de regresión y sus coeficientes de determinación ( $R^2$ ) para estimar el contenido de humedad retenido a Punto de marchitez .....	18
Tabla 6: Valores de error cuadrático medio para contenido de humedad a Capacidad de campo y Punto de marchitez.....	18
Tabla 7: Valores referenciales del criterio de Nash-Sutcliffe: .....	19
Tabla 8: Serie de datos de las 77 muestras de suelo según las partículas primarias y los parámetros hídricos.....	54
Tabla 9: Pruebas de normalidad de Kolmogorov-Smirnov y Shapiro Wilk.....	56
Tabla 10: ANOVA para capacidad de campo .....	58
Tabla 11: ANOVA para punto de marchitez .....	59
Tabla 12: Residuos y estadísticos para la determinación de puntos atípicos e influyentes para capacidad de campo.....	64
Tabla 13: Residuos y estadísticos para la determinación de puntos atípicos e influyentes para punto de marchitez.....	65
Tabla 14: Funciones de edafotransferencia (FET's) y sus coeficientes de determinación ( $R^2$ ) para estimar el contenido de humedad retenido a capacidad de campo y punto de marchitez .....	66
Tabla 15: Validación de las funciones de edafotransferencia (FET's).....	67



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama triangular de las clases texturales básicas del suelo .....	7
Figura 2: Equipo de TDR en campo .....	10
Figura 3: Tensiómetro con vacuómetro (unidades en centibares).....	11
Figura 4: Sonda de neutrones .....	12
Figura 5: Esquema de una olla con placa de cerámica porosa .....	12
Figura 6: Vista de una sección del plato de cerámica del plato extractor de presión .....	13
Figura 7: Vista general de los aditamentos del plato extractor de presión .....	13
Figura 8: Representación de las constantes hídricas del suelo .....	15
Figura 9: Ubicación geográfica de la UNALM .....	21
Figura 10: Ubicación geográfica de las calicatas en la UNALM .....	26
Figura 11: Calicata hecho con máquina retroexcavadora y calicata hecha a mano .....	27
Figura 12: Calicata con los tres horizontes de suelo .....	28
Figura 13: Recolección de muestras de suelo.....	29
Figura 14: Ubicación de las calicatas con GPS .....	30
Figura 15: Tamiz de abertura de 2mm.....	32
Figura 16: Muestras seleccionadas para el ensayo de capacidad de campo.....	32
Figura 17: Saturación de plato y las muestras de suelo por 24 horas .....	33
Figura 18: Pesado de las muestras saturadas en la balanza .....	33
Figura 19: Muestras de suelo ubicadas en la Olla de Richards .....	34
Figura 20: Presión a 0.33 bar para Capacidad de campo.....	34
Figura 21: Muestras de suelo en el horno.....	35
Figura 22: Muestras de suelo en el decantador.....	36
Figura 23: Pesado de la muestra a 0.33 bar .....	36
Figura 24: Suelo puesto en los anillos el plato de cerámica .....	37
Figura 25: Saturación del conjunto (plato, anillo y suelo) .....	37
Figura 26: Platos y muestras saturadas para ser llevados a la cámara de alta presión .....	38
Figura 27: Presión a 15 bar correspondiente a humedad a punto de marchitez .....	39
Figura 28: Salida de agua por el tubo .....	39
Figura 29: Muestras de suelo después de retirar la presión.....	40
Figura 30: Muestras de suelo puestas en el horno .....	40
Figura 31: Pesado de las muestras de suelo.....	41

Figura 32: Linealidad de los residuos.....	44
Figura 33: Normalidad de los residuos.....	44
Figura 34: Homocedasticidad de los residuos .....	45
Figura 35: Gráfico de frecuencias de las clases texturales de suelo.....	49
Figura 36: Identificación de la clase textural de los suelos de la UNALM.....	50
Figura 37: Diagrama de cajas para capacidad de campo y punto de marchitez .....	52
Figura 38: Gráficos de dispersión entre Textura y Capacidad de campo.....	57
Figura 39: Gráficos de dispersión entre Textura y Punto de marchitez .....	57
Figura 40: Gráficos de dispersión de cada variable independiente con los residuos .....	61
Figura 41: Histograma de residuo estandarizado .....	62
Figura 42: Gráficos de dispersión de residuo estandarizado con el valor estimado.....	62
Figura 43: Gráficos de dispersión.....	63
Figura 44: Calicata con diferentes horizontes de suelo .....	74
Figura 45: Identificación de la capa de suelo a muestrear.....	74
Figura 46: Muestras de suelo saturadas para capacidad de campo.....	75
Figura 47: Muestras de suelo en el decantador.....	75
Figura 48: Muestras de suelo listas para ser llevadas al horno.....	76
Figura 49: Muestras de suelo para capacidad de campo en el horno .....	76
Figura 50: Presentación de las muestras de suelo para punto de marchitez .....	77
Figura 51: Muestras de suelo saturadas para punto de marchitez .....	77
Figura 52: Presentación de las muestras de suelo y la Olla de Richards.....	78
Figura 53: Anillos de plástico con muestras de suelo en el horno .....	78
Figura 54: Laboratorio de riego y drenaje .....	79
Figura 55: Platos de cerámica y muestras de suelo .....	79
Figura 56: Muestras de suelo para punto de marchitez .....	80
Figura 57: Muestras de suelo para capacidad de campo .....	80
Figura 58: Olla de baja presión y Cámara de alta presión.....	81
Figura 59: Salida de agua de la Olla de Richards (Cámara de alta presión) .....	81

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Panel fotográfico.....	74
---------------------------------	----

## RESUMEN

La determinación de los parámetros hídricos en la Universidad Nacional Agraria La Molina – UNALM, sigue siendo una tarea complicada y que demanda mucho esfuerzo y tiempo, una alternativa más económica y rápida es la utilización de funciones de edafo transferencia para determinar tales parámetros hídricos.

Este trabajo de investigación fue realizado en el laboratorio de riego y drenaje de la facultad de Ingeniería Agrícola de la UNALM, utilizando 77 muestras de suelo tomadas en los campos agrícolas de la universidad. El objetivo es determinar las funciones de edafo transferencia (FET's), que permitan estimar los parámetros hídricos del suelo en función a las partículas primarias, utilizando la olla de presión de Richards, para conocer con celeridad los valores de retención de humedad, en función de la granulometría de los suelos agrícolas, de la Universidad Nacional Agraria La Molina – UNALM.

La metodología para determinar los parámetros hídricos (capacidad de campo y punto de marchitez) fue muy distinta en ambos casos, desde la preparación del suelo, la saturación y el funcionamiento del plato extractor para las presiones de 0.33 bar y 15 bar. Para la determinación de las FET's, se realizó tres análisis estadísticos; primero verificar los resultados obtenidos del plato extractor de presión, a través del diagrama de cajas y realizar correlaciones de Pearson con las partículas primarias, segundo formular un primer modelo de FET's mediante la regresión lineal múltiple, tomando como variables independientes a las partículas primarias (arcilla, limo y arena) y variable dependiente a los parámetros hídricos (capacidad de campo y punto de marchitez). Por último, mediante el análisis de los residuos y las observaciones influyentes obtenidos de ambos modelos matemáticos, se determinó un segundo modelo de funciones de edafotransferencia que para la capacidad de campo es  $\%W_{cc} = 0.437 \times \%Ar + 0.287 \times \%L - 0.027 \times \%A + 2.009$  y para el punto de marchitez es  $\%W_{pm} = 0.317 \times \%Ar + 0.158 \times \%L - 0.040 \times \%A + 2.205$ . Cada función de edafotransferencia se validó mediante el Nash-Sutcliffe (NSE), el coeficiente de determinación  $R^2$  y el error cuadrático medio entre los valores determinados en laboratorio y valores estimados por los modelos matemáticos, para así determinar su ajuste y su grado de dispersión.

**Palabras clave:** Capacidad de campo, punto de marchitez, regresión lineal múltiple, determinación de la textura.

## ABSTRACT

The determination of water parameters at the National Agrarian University La Molina - UNALM, remains a complicated task and requires a lot of effort and time, a more economical and faster alternative is the use of transfer soil functions to determine such water parameters.

This research work was carried out in the irrigation and drainage laboratory of the Faculty of Agricultural Engineering of UNALM, using 77 soil samples taken in the agricultural fields of the university. The objective is to determine the transfer soil functions (FET s), which allow to estimate the soil water parameters according to the primary particles, using the pressure cooker of Richards, to quickly know the moisture retention values, in function of the granulometry of the agricultural soils, of the National Agrarian University La Molina - UNALM.

The methodology for determining the water parameters (field capacity and wilt point) was very different in both cases, from the preparation of the soil, the saturation and the operation of the extractor plate to the pressures of 0.33 bar and 15 bar. For the determination of the FET s, three statistical analyses were performed; first, the results obtained from the pressure extractor plate were verified through the box diagram and Pearson correlations were made with the primary particles, second formulate a first model of FET s by means of multiple linear regression, taking as independent variables the primary particles (clay, silt and sand) and variable dependent to the water parameters (field capacity and point of wilt). Finally, by analysing the residues and the influential observations obtained from both mathematical models, a second model of soil transfer functions was determined which for the field capacity is  $\% W_{cc} = 0.437 \times \% Ar + 0.287 \times \% L - 0.027 \times \% A + 2.009$  and for the wilt point is  $\% W_{pm} = 0.317 \times \% Ar + 0.158 \times \% L - 0.040 \times A + 2.205$ . Each pedotransference function was validated by the Nash-Sutcliffe (NSE), the coefficient of determination  $R^2$  and the mean quadratic error between values determined in laboratory and values estimated by mathematical models, to determine its fit and degree of dispersion.

**Keywords:** Field capacity, wilting point, multiple linear regression, texture determination.

# I. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Justificación

Uno de los problemas aún existentes en los campos agrícolas de la Universidad Nacional Agraria La Molina - UNALM, es la poca información sobre los parámetros hídricos, estos, se pueden relacionar fácilmente con las partículas primarias utilizando métodos estadísticos que permitan estimar de manera práctica y rápida la humedad de un suelo con solo conocer la textura del mismo.

En ese contexto, el presente estudio ha sido realizado porque permite obtener información de manera indirecta de los parámetros hídricos en función de la composición granulométrica de los suelos agrícolas. Este método constituye a lo que se llama funciones de edafotransferencia (FET's) que se estiman mediante ecuaciones de regresión lineal o no lineal que, de manera empírica, permitirían predecir la humedad en capacidad de campo y punto de marchitez de cualquier tipo de suelo en función de los parámetros físicos tales como; la textura, la materia orgánica, la densidad aparente, etc., ya que sin ello el trabajo de encontrar dicha humedad resultaría tedioso, caro y demandaría mucho tiempo.

Para determinar las FET's, se utilizó una base de datos de 77 muestras de suelo pertenecientes a todos los campos agrícolas de la UNALM. Estas muestras de suelo fueron analizadas en laboratorio para determinar la textura y los parámetros hídricos utilizando la metodología de la olla de Richards, que de manera indirecta permite obtener la humedad del suelo aplicando una presión de 0.33 bar para capacidad de campo y 15 bar para punto de marchitez respectivamente. Luego de ello estos valores observados se ajustaron mediante la regresión lineal múltiple para así obtener las FET's para capacidad de campo y punto de marchitez, cada uno de ellos con alto coeficiente de determinación y validados con estadísticos de evaluación como el Nash-Sutcliffe (NSE) y el error cuadrático medio, para conocer su ajuste y grado de dispersión, necesarios para una mayor confiabilidad en la utilización de las FET's.

Estas FET's serán de gran ayuda, ya que permitiría un ahorro de tiempo y es de inmediata disponibilidad. Además, se podría determinar la humedad del suelo no solo de la UNALM, si no, de zonas aledañas o inclusive lugares con similares condiciones climáticas y características de suelo parecidas con las que han sido desarrolladas en el presente trabajo de investigación.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo general**

Determinar las funciones de edafo transferencia (FET's), que permitan estimar los parámetros hídricos del suelo en función a las partículas primarias, utilizando la olla de presión de Richards, para conocer con celeridad los valores de retención de humedad, en función de la granulometría de los suelos agrícolas, de la Universidad Nacional Agraria La Molina – UNALM.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- Determinar la humedad a capacidad de campo y punto de marchitez mediante el uso de la olla de presión de Richards, y realizar correlaciones simples con las partículas primarias de los suelos para determinar el grado de asociación y verificar si la relación que existe entre ellas es lineal.
- Determinar mediante ecuaciones de regresión lineal múltiple las funciones de edafotransferencia para la humedad a capacidad de campo y punto de marchitez, a partir de los resultados y análisis de los parámetros hídricos y físicos.
- Validar las funciones de edafotransferencia estimados, con los valores obtenidos de la olla de presión de Richards, utilizando los estadísticos de evaluación como el Nash-Sutcliffe (NSE), el coeficiente de determinación  $R^2$ , y el error cuadrático medio, para determinar su ajuste y su grado de dispersión.

## **II. REVISIÓN DE LITERATURA**

### **2.1. Textura**

#### **2.1.1. Definición**

La textura hace referencia a la composición granulométrica de la fracción inorgánica del suelo. Determinadas propiedades de las partículas minerales del suelo están condicionadas por su tamaño. Existen diversos tipos de clasificación utilizadas en la actualidad. Aunque todas aceptan de manera establecida los términos de grava, arena, limo y arcilla, difieren ligeramente en los límites establecidos para cada clase (Agudo, 2014).

La textura es una propiedad exclusiva de la fase sólida del suelo y, más específicamente, de la fracción inorgánica de aquella. Es, además, una propiedad fuertemente dependiente del material parental del suelo (Jaramillo, 2002).

Está determinada por la conformación granulométrica o composición mecánica del suelo, e indica la proporción que existe entre las diferentes fracciones de tamaño de partículas sólidas o fracciones granulométricas: arena, limo y arcilla, que corresponden a los siguientes rangos de tamaño de partículas de acuerdo a la escala internacional (Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo) (Vásquez et al., 2017).

#### **2.1.2. Determinación de la textura**

La determinación de la textura consiste simplemente en indicar, para un suelo dado la proporción que ocupa en él cada elemento constituyente: arena gruesa, arena fina, limo y arcilla. Se determina igualmente la cantidad de grava y gravilla. En suma, es un análisis granulométrico (Rucks et al., 2004).



### **2.1.2.1. Análisis granulométrico**

El análisis textural o granulométrico es el conjunto de operaciones útiles para determinar las proporciones cuantitativas de cada fracción granulométrica que presenta un suelo. Existen diversas técnicas para determinación de texturas. En laboratorio la más común es por volumen de sedimentación, por el método de la pipeta (Robinson) y por el método del hidrómetro Bouyoucos. A través de estos análisis los suelos pueden ser clasificados en Arenoso, Franco arcilloso, Franco limoso, etc. (Ciancaglini, 2019).

Según FAO (2020), la determinación de la granulometría del contenido de las arenas se hace mediante tamices de diferentes tamaños. Los contenidos de limo y de arcilla mediante el método de la pipeta de Robinson que se basa en la velocidad de sedimentación de estas partículas según la ley de Stokes.

### **2.1.2.2. Tipos de textura según la cantidad de partículas de suelo**

#### **Suelos arenosos:**

Son suelos muy permeables, pues en ellos predominan los macro poros. Su capacidad de retención de agua capacidad de campo es baja, y también lo es el agua disponible por las plantas o agua útil, pues presentan una baja micro porosidad (Ibáñez, 2006).

Su tamaño de partícula es la más grande, partículas individuales con formas dentadas irregulares o redondas y planas. El suelo arenoso es muy bueno para la producción de hortalizas debido a que el aire y agua tienen buen movimiento, sin compactarse. Sin embargo, el manejo del agua y fertilizantes, es muy importante. Esto debido a con riego pesados se lixivia el agua y los nutrimentos a una profundidad que la planta no puede aprovechar. Se recomiendan riegos frecuentes pero ligeros (Martínez de la Cerda, 2015, citado por López, 2016).

#### **Suelos limosos:**

En ellos la permeabilidad varía mucho según sea su estructura. Puede ser muy lenta cuando la estructura es masiva (sin formar agregados) o bastante rápida cuando la estructura es grumosa (Ibáñez, 2006).

### **Suelos arcillosos:**

Son muy impermeables (fácilmente encharcables) y mal aireados, pues en ellos predominan los micro poros. Son los suelos que retienen mayor cantidad de agua y aunque una gran parte de ella es retenida con mucha fuerza y no está disponible para las plantas (son los que presentan mayor un punto de marchitamiento más alto), presentan una gran cantidad de agua disponible o agua útil (Ibáñez, 2006).

### **Suelos francos:**

De todas formas, la textura franca agrupa variadas composiciones entre un extremo y otro de este tipo, según contenga más o menos arena, arcilla o limo y, por tanto, puede ser más o menos adecuada dependiendo de la especie vegetal de que se trate. En estos casos debe atenderse a las características del tipo de especie que deseamos cultivar para conocer qué tipo de suelo franco es el más adecuado (Martínez de la Cerda, 2015, citado por López, 2016).

**Tabla 1: Clasificación de las partículas de suelo según su tamaño**

<b>Sistema del Depto. de Agricultura de EE.UU.</b>		<b>Sistema Internacional</b>
Fracción del Suelo	Diámetros límites en mm.	Diámetros límites en mm.
Arena muy gruesa	2.00 – 1.00	
Arena gruesa	1.00 – 0.50	2.00 – 0.20
Arena Media	0.50 – 0.25	
Arena fina	0.25 – 0.10	0.20 – 0.002
Arena muy fina	0.10 – 0.05	
Limos	0.05 – 0.002	0.02 – 0.002
Arcilla	Menos de 0.002	Menos de 0.002

FUENTE: Rucks et al. (2004).

Según FAO (2020) En general se puede decir que los suelos arenosos tienen buena aireación, son fáciles de labrar, son deficientes en nutrientes para las plantas, con baja retención de agua ya que se desecan con facilidad y son muy permeables. En los suelos limosos se producen efectos de impermeabilidad y mala aireación, carecen de propiedades coloidales y no tienen apenas la posibilidad de formar agregados. Los suelos arcillosos son ricos en nutrientes, pero si hay un exceso de arcilla (>30%) son impermeables, las labores agrícolas

son difíciles debido a su fuerte plasticidad en estado húmedo o a una excesiva compactación en estado seco. Los suelos con textura franca (equilibrada) es la ideal para el cultivo, aunque hay que tener en cuenta otros factores como el contenido en materia orgánica, régimen de humedad del suelo, clima, etc.

### 2.1.3. Clases texturales

Para determinar el tipo granulométrico o clase textural de un suelo, se recurre a varios métodos. Se utilizan cada vez más los diagramas triangulares, siendo el triángulo de referencia un triángulo rectángulo o un triángulo equilátero. Se usa actualmente, de un modo casi unánime, un triángulo equilátero. Cada uno de sus lados a un eje graduado de 10 en 10, de 0 a 100, sobre el cual se transporta la cantidad del elemento que representa; en general un lado del triángulo corresponde a la arcilla, el otro al limo, el tercero a la arena (Rucks et al., 2004).

**Tabla 2: Clases texturales según la cantidad de partículas del tipo de suelo**

<b>Nombres vulgares de los suelos (textura gruesa)</b>	<b>Arena (%)</b>	<b>Limo (%)</b>	<b>Arcilla (%)</b>	<b>Clase textural</b>
Suelos arenosos (textura gruesa)	86 - 100	0 - 14	0 - 10	Arenoso
	70 - 86	0 - 30	0 - 15	Franco arenoso
Suelos francos (textura moderadamente gruesa)	50 - 70	0 - 50	0 - 20	Franco arenoso
	23 - 52	28 - 50	7 - 27	Franco
Suelos francos (textura mediana)	20 - 50	74 - 88	0 - 27	Franco limoso
	0 - 20	88 - 100	0 - 12	Limoso
	20 - 45	15 - 52	27 - 40	Franco arcilloso
Suelos francos (textura moderadamente fina)	45 - 80	0 - 28	20 - 35	Franco arenoso arcilloso
	0 - 20	40 - 73	27 - 40	Franco limoso arcilloso
	45 - 65	0 - 20	35 - 55	Arcilloso arenoso
Suelos arcillosos (textura fina)	0 - 20	40 - 60	40 - 60	Arcillosos limoso
	0 - 45	0 - 40	40 - 100	Arcilloso

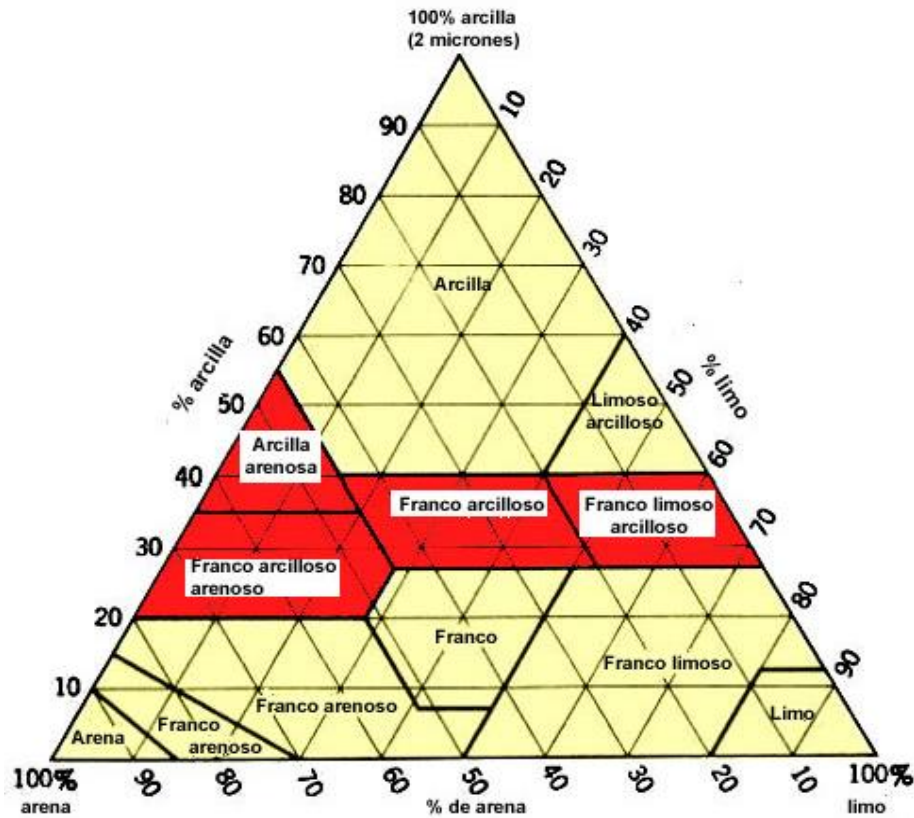
FUENTE: Rucks et al. (2004).

Se utilizan numerosos tipos de diagramas (circulares, de barras), pero el más ampliamente

empleado es el triángulo de texturas o diagrama textural.

### 2.1.3.1. Identificación de la textura

El triángulo de textura de suelos según la FAO se usa como una herramienta para clasificar la textura. Partículas del suelo que superan tamaño de 2.0 mm se definen como piedra y grava y también se incluyen en la clase de textura. Por ejemplo, un suelo arenoso con 20 % de grava se clasifica como franco arenoso con presencia de gravas. Cuando predominan componentes orgánicos se forman suelos orgánicos en vez de minerales (FAO, 2016, citado por López 2016).



**Figura 1: Diagrama triangular de las clases texturales básicas del suelo**

FUENTE: USDA

En la Tabla 3 se observa el rango de valores de humedad a capacidad de campo y punto de marchitez de acuerdo a la clase textural del suelo.

**Tabla 3: Parámetros hídricos de los suelos en función de su clase textural**

Clase textural	C.C. (% en peso)	P.M. (% en peso)
Arena	9(5-16)	4(2-6)
Franco arenoso	14(10-20)	6(4-8)
Franco	22(15-30)	10(8-12)
Franco arcilloso	27(25-35)	13(11-15)
Arcilla limosa	31(27-40)	15(13-17)
Arcilla	35(30-70)	17(15-19)

FUENTE: UNAM (2010)

## 2.2. Estado energético

El estado energético del agua y su movimiento dentro del suelo están condicionados por su energía potencial. Al no existir una escala absoluta de energía, se expresa el potencial con relación a un estado arbitrario tomado como potencial cero. En el estado de referencia, el agua pura no está sometida a fuerzas externas distintas de la gravedad, no está influenciada por la fase sólida y su interfase con la fase gaseosa es plana, está sometida a 1 atm de presión y a la misma temperatura que el suelo (Agudo, 2014).

### 2.2.1. Potencial hídrico

Es definido como el trabajo requerido para transferir una unidad infinitesimal de agua, desde un estado de referencia (donde el potencial es tomado como cero) a la situación donde el potencial tiene un valor definido. El potencial hídrico total del agua del suelo le da el valor del nivel energético con que se encuentra retenida el agua en el suelo. A partir de allí conociendo ese nivel energético, se puede comprender porque el agua puede moverse dentro del suelo, porque la planta la puede tomar, etc. Se le llama potencial porque representa energía en función de masa, de volumen o de peso. Para poder determinar el estado energético específico del agua de un suelo, se dice que el nivel de referencia tiene un potencial hídrico total igual a cero (García et al., 2012). El potencial hídrico total del agua del suelo ( $\psi_{HT}$ ) está determinado por:

$$\psi_{HT} = \psi_g + \psi_m + \psi_p + \psi_o$$

- Potencial gravitacional ( $\psi_g$ )
- Potencial mátrico ( $\psi_m$ )
- Potencial presión ( $\psi_p$ )
- Potencial osmótico ( $\psi_o$ ).

#### **2.2.1.1. Potencial gravitacional**

Es la parte potencial del agua que se debe a la fuerza de la gravedad, mediante el cual, al añadir agua a un suelo seco, ésta se mueve hacia abajo debido a la acción de la gravedad. Este potencial desempeña un papel importante en la eliminación de los excesos de agua del suelo. Es positivo para los puntos situados encima del sistema de referencia, y negativo para los puntos situados debajo de sistema de referencia (Calvache, 2010).

#### **2.2.1.2. Potencial de presión**

La Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo lo define como “La cantidad de trabajo que debe realizarse por unidad de cantidad de agua pura, para transportar de manera isotérmica y reversible, una cantidad infinitesimal de agua desde un deposito que contiene una solución de idéntica composición a la del suelo, sometida a la presión atmosférica, hasta el agua del suelo en el punto considerado” (Calvache, 2010).

#### **2.2.1.3. Potencial osmótico**

Conti (2000): Es la parte del potencial de agua del suelo que resulta del efecto combinado de todas las especies de solutos presente en el suelo. La influencia de los solutos sobre el potencial se demuestra comúnmente separando la solución del suelo del agua pura mediante una membrana semipermeable.

#### **2.2.1.4. Potencial mátrico**

Es la proporción del potencial hídrico total que puede ser atribuida a la atracción de las partículas del suelo, es decir a la matriz del suelo. En este potencial influyen las fuerzas de adsorción, las fuerzas capilares, y la interfase agua-aire. La presión capilar representa al potencial matriz. Las partículas del suelo se unen en agregados, constituyendo la porosidad del suelo. Esos poros del suelo van a desarrollar una presión capilar. Como el potencial matriz está dado por la matriz o porosidad del suelo, siempre es una supresión, es decir que

el agua queda retenida. Hay que invertir trabajo para sacarla. Es por eso que el potencial matriz es siempre negativo y actúa en suelos insaturados (García et al., 2012).

Es el originado por la atracción de la matriz del suelo sobre las moléculas de agua. La relación entre potencial mátrico y contenido de agua se denomina curva característica. El potencial matricial será tanto más negativo cuanto más seco este el suelo (Villalobos et al., 2009).

## **2.2.2. Medidas del potencial del agua del suelo**

.

### **2.2.2.1. Métodos de campo**

#### **Reflectometría (TDR):**

En este método se utiliza un equipo de reflectometría de dominio temporal (TDR), el cual determina la humedad volumétrica de los suelos. Consta de varillas metálicas que se introducen en el suelo y un emisor receptor de impulsos magnéticos, genera un pulso electromagnético y mide el tiempo que tarda en recorrer las varillas, el que será mayor o menor dependiendo del contenido de humedad del suelo (Mendoza, 2013).



**Figura 2: Equipo de TDR en campo**

FUENTE: Manual de uso S.M.C.A.L. (2002)

### **Tensiómetro:**

Jaramillo (2002). El principio con que funcionan estos equipos consiste en establecer un equilibrio estático entre la humedad que tiene el suelo y la humedad que alcanza la copa cerámica que, por ser porosa, intercambia agua con su entorno hasta alcanzar esa condición de equilibrio. La entrada o la salida de agua del tensiómetro genera un cambio de presión en el equipo, con respecto a las condiciones de calibración del mismo, que es registrado por el instrumento que para el efecto tenga aquel y, generalmente, es expresado en unidades de energía/volumen. Estos equipos dan lecturas confiables de potencial hasta valores de  $-0.8$  atm ( $\sim -800$  cm).



**Figura 3: Tensiómetro con vacuómetro (unidades en centibares)**

FUENTE: Jaramillo (2002)

### **Sonda de neutrones:**

Mendoza (2013). Se basa en la emisión de neutrones a partir de una fuente radioactiva la cual se introduce en el suelo a través de tubos de aluminio instalados en forma permanente, la fuente se coloca a la profundidad a la cual se desea conocer el contenido de humedad, al ser activado, la fuente emite neutrones rápidos.





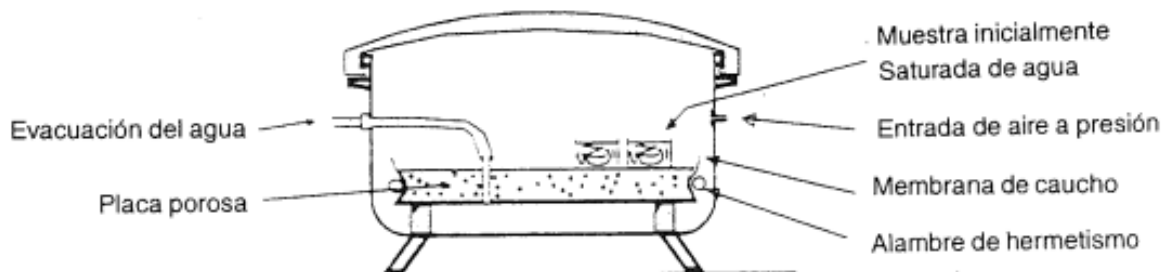
**Figura 4: Sonda de neutrones**

FUENTE: Mendoza (2013)

### 2.2.2.2. Métodos de laboratorio

#### Olla de Richards

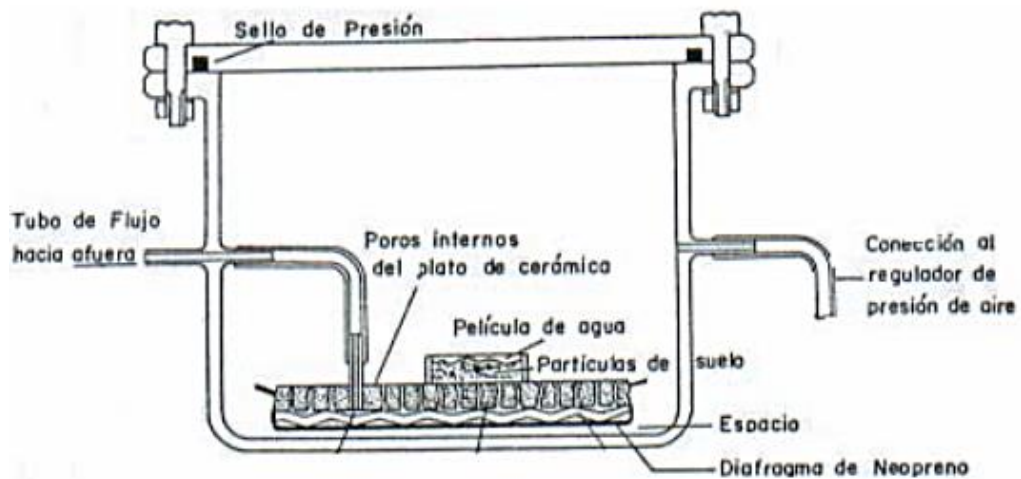
El aparato de placa (u olla) de presión y el de membrana de presión difieren casi solamente en la clase de material y en el rango de presión resultante, en el que funciona. En el equipo de placa de presión se usa una placa de cerámica. Tales placas están limitadas por la presión del aire que pueden soportar sin dejarlo pasar. Generalmente, con esta clase de placas se han usado presiones de hasta 1 bar (0,10 MPa), en la membrana se puede trabajar con presiones de 1 - 5 bares (0,1 - 1,5 MPa) (Ratto, 2015, citado por López, 2016).



**Figura 5: Esquema de una olla con placa de cerámica porosa**

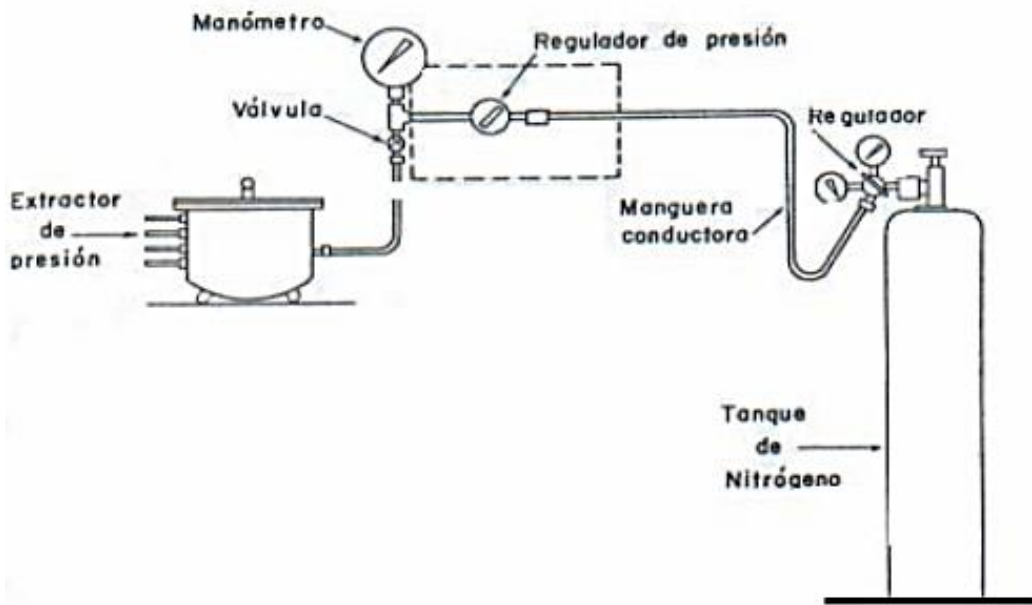
FUENTE: Conti (2000)

Este método se compone de una olla o cámara que, cerrada herméticamente, recibe presión de aire o un gas inerte (N) desde un compresor. De esta manera, aplicando una presión se simula la condición de succión a la cual se ve sometida el agua en el suelo. Por el principio de translación de ejes, si se garantiza presión de agua igual a cero, la presión de aire (presión de gas) aplicada será igual a la succión matricial del suelo (50 kPa de presión de aire aplicada, son -50 kPa de succión matricial) (Townsend et al., 2000, citado por Gómez, 2009).



**Figura 6: Vista de una sección del plato de cerámica del plato extractor de presión**

FUENTE: Gómez (2009).



**Figura 7: Vista general de los aditamentos del plato extractor de presión**

FUENTE: Gómez (2009)

## **2.3. Contenido del agua en el suelo**

### **2.3.1. Saturación**

Es el contenido de agua de un suelo en el que todos sus poros están llenos de agua. Esta situación puede observarse inmediatamente después de una lluvia o riego abundante y se considera que el potencial mátrico, con que el agua es retenida por el suelo, es nulo (Andriani 2018, citado por Quiroga et al., 2018).

### **2.3.2. Capacidad de campo**

La capacidad de campo se define como la humedad del suelo que se consigue dejando drenar el suelo saturado y está relacionado con el contenido de humedad para el cual la tensión es de 1/3 de atmósfera en suelos arcillosos, 1/5 de atmósfera para los suelos francos y 1/10 de atmósfera para los suelos arenosos (Calvache, 2012).

Cuando todos los poros están llenos, el suelo empieza a drenar, en forma natural, el agua se mueve de la zona de raíces hasta las capas más profundas. La capacidad de drenaje de los suelos depende de su textura, los suelos arenosos pueden drenar una cantidad de agua mayor que los suelos arcillosos. El tiempo de drenado puede ser de un día para los suelos arenosos y tres días para los suelos arcillosos. Cuando se ha drenado el agua, en los poros queda una cantidad de agua que no puede drenarse, en esta condición los suelos se encuentran en capacidad de campo (Mendoza, 2013).

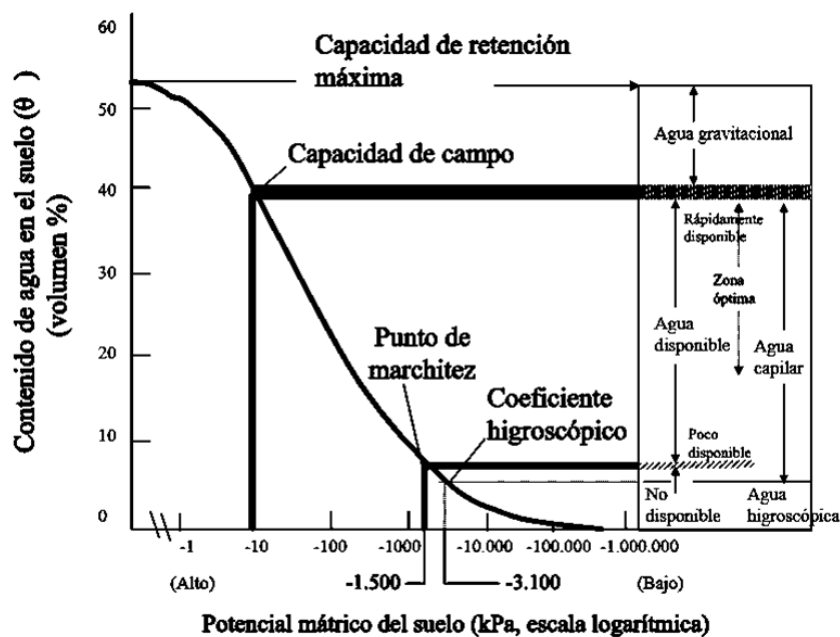
### **2.3.3. Punto de marchitamiento**

El punto de marchitez permanente es una constante hídrica del suelo que tiene un significado fisiológico. El valor común de la succión matricial que se considera limitante para la sobrevivencia de las plantas, es de 15 bares. Sin embargo, cada especie de planta tiene su propia capacidad para extraer agua del suelo, comprendida entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente. En la producción agrícola se hace diferencia entre la extracción del agua para la sobrevivencia. Para el crecimiento productivo y activo, varias plantas tienen un límite entre 1 y 3 bares de succión (FAO, 2015).

El punto de marchitez permanente es el contenido de humedad en el cual las plantas no son capaces de tomar agua del suelo y corresponde a una tensión de 15 atmósferas, para la mayoría de cultivos, pero al ser un concepto dinámico que depende de la relación suelo planta, puede disminuir a 10 atmósferas (Calvache, 2012).

### 2.3.4. Agua aprovechable

Mendoza (2013). Dependiendo del nivel de humedad que exista en el suelo las plantas pueden hacer uso o no de dicha agua. El contenido de humedad en el cual las plantas pueden hacer uso del agua se encuentra entre los niveles de capacidad de campo y punto permanente de marchitez. Para que una planta se desarrolle en una forma adecuada se debe mantener el nivel de humedad muy cerca de la capacidad de campo, regando poco y en forma frecuente (cada uno o dos días), esto se logra con sistemas de riego localizados como los métodos por goteo y microaspersión.



**Figura 8: Representación de las constantes hídricas del suelo**

FUENTE: Shaw (2014).

Según Valverde (1998). La fórmula para calcular el agua disponible es:

$$\%H = CC - PMP$$

%H: porcentaje de humedad disponible

CC: capacidad de campo en %

PMP: punto de marchitez permanente en %

### **2.3.5. Determinación indirecta de la capacidad de campo y el punto de marchitamiento**

Fuentes (2003), señala que la cantidad de agua retenida por un suelo en la capacidad de campo y en el punto de marchitamiento se mide en laboratorio o en el mismo terreno. A falta de datos de análisis que den la humedad del suelo en estas fases, se pueden calcular estos valores de un modo aproximado, a partir de otros datos analíticos más fáciles de obtener, tales como la composición de la textura. Entre las fórmulas más utilizadas están las siguientes:

Según Fuentes (2003). La fórmula para calcular la humedad a capacidad de campo es:

$$Cc = 0,48 Ac + 0,162 L + 0,023 Ar + 2,62 \quad (\text{Fórmula de Peele})$$

- Cc = humedad a la capacidad de campo, expresada como humedad gravimétrica, en tanto por ciento.
- Ac = contenido de arcilla, expresado en humedad gravimétrica.
- L = contenido de limo, expresado en humedad gravimétrica.
- Ar = contenido de arena, expresado en humedad gravimétrica.

Según Fuentes (2003). La fórmula para calcular la humedad a punto de marchitez es:

$$Pm = 0,302 Ac + 0,102 L + 0,0147 Ar \quad (\text{Fórmula de Briggs})$$

- Pm = humedad en el punto de marchitamiento, expresada como humedad gravimétrica, en tanto por ciento.
- Ac, L y Ar tienen el mismo significado que en la fórmula de cálculo de la humedad en la capacidad de campo.

#### 2.4. Funciones de edafotransferencia (FET's)

El procedimiento para la formulación de FET's se basa en el establecimiento de análisis de regresión lineal múltiple entre características físicas (variables independientes) e hídricas (variables dependientes). Una vez verificada la bondad del ajuste de las funciones y obtenidas las FET's que mejor resultado han ofrecido (valor máximo de R<sup>2</sup>, p<0.001) (Martínez et al., 2001).

Estas funciones se estiman a partir de información básica (casanova et al, 2003), como la clasificación textural, densidad aparente, contenido de materia orgánica y distribución de tamaño de partículas (Wosten et al., 1999), información topográfica (Pachepsky et al, 2001; Romano y Palladino, 2002) o propiedades mecánicas (Pachepsky et al, 1998). Por otro lado, la naturaleza empírica de las FET's restringe su uso solo a la región en que fueron desarrollados, señalándose que cualquier extrapolación necesita validación (Patil y Rajput, 2009, citado por Yáñez et al., 2015).

En las tablas 4 y 5 se muestran las ecuaciones de regresión lineal múltiple, tanto para humedad a capacidad de campo como para punto de marchitez, aplicados a 45 horizontes de suelo en la Cuenca del lago de Valencia. Cada una de estas, presentan sus respectivos coeficientes de determinación (R<sup>2</sup>).

**Tabla 4: Ecuaciones de regresión y sus coeficientes de determinación (R<sup>2</sup>) para estimar el contenido de humedad retenido a Capacidad de campo**

Autor	Ecuación	R <sup>2</sup>
Gupta-Larson, 1979	$3.075xb + 5.886xc + 8.039xd + 2.208xe - 14.340xf$	
Rawls et al, 1982	$0.2576 - 0.0020xb + 0.0036xd + 0.0299xe$	0.87
Delgado y barreto, 1988	$29.06 - 0.290xb - 0.253xc + 0.135xd + 2.56xe$	0.79
Malavé, N. 1991	$23.953 - 0.2228xb + 4.6436xe$	0.85

FUENTE: Pineda y Vilorio (1997).

**Tabla 5: Ecuaciones de regresión y sus coeficientes de determinación ( $R^2$ ) para estimar el contenido de humedad retenido a Punto de marchitez**

<b>Autor</b>	<b>Ecuación</b>	<b><math>R^2</math></b>
Gupta-Larson, 1979	$-0.059xb + 1.142xc + 5.766xd + 2.228xe - 2.671xf$	
Rawls et al, 1982	$0.01260 + 0.0050xd + 0.0158xe$	0.80
Delgado y barreto, 1988	$16.55 - 0.174xb - 0.164xc + 0.154xd + 1.24xe$	0.87
Malavé, N. 1991	$16.1608 - 0.1877xb + 1.0528xe$	0.80

FUENTE: Pineda y Viloría (1997).

En la Tabla 6 se muestran los valores de ECM estimados a partir de las ecuaciones presentadas en las tablas 4 y 5.

**Tabla 6: Valores de error cuadrático medio para contenido de humedad a Capacidad de campo y Punto de marchitez**

<b>Autor</b>	<b>Capacidad de campo</b>	<b>Punto de marchitez</b>
Gupta-Larson, 1979	2043.58	492.28
Rawls et al, 1982	99.73	27.19
Delgado y barreto, 1988	535.45	252.14
Malavé, N. 1991	360.21	195.09

FUENTE: Pineda y Viloría (1997).

### 2.4.1. Regresión lineal múltiple

La regresión lineal múltiple permite generar un modelo lineal en el que el valor de la variable dependiente o respuesta (Y) se determina a partir de un conjunto de variables independientes llamadas predictores ( $X_1, X_2, X_3, \dots$ ). Es una extensión de la regresión lineal simple, por lo que es fundamental comprender esta última. Los modelos de regresión múltiple pueden emplearse para predecir el valor de la variable dependiente o para evaluar la influencia que tienen los predictores sobre ella (esto último se debe que analizar con cautela para no malinterpretar causa-efecto) (Amat, 2016). Los modelos lineales múltiples siguen la siguiente ecuación:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \dots + \beta_n X_{ni} + e_i$$

$\beta_0$  = es la ordenada en el origen, el valor de la variable dependiente Y cuando todos los predictores son cero.

$\beta_i$  = es el efecto promedio que tiene el incremento en una unidad de la variable predictora  $X_i$  sobre la variable dependiente  $Y_i$ , manteniéndose constantes el resto de variables. Se conocen como coeficientes parciales de regresión.

$e_i$  = es el residuo, la diferencia entre el valor observado y el estimado por el modelo.

#### 2.4.2. Validación de las funciones de edafo-transferencia

##### **Criterio de Nash-Sutcliffe (NSE):**

Mide cuánto de la variabilidad de las observaciones es explicada por la simulación. Si la simulación es perfecta, E=1; si se intentase ajustar las observaciones con el valor promedio, entonces E=0. A continuación valores referenciales del criterio del Nash-Sutcliffe. (Cabrera, 2012).

**Tabla 7: Valores referenciales del criterio de Nash-Sutcliffe**

NSE	Ajuste
<0.2	Insuficiente
0.2 – 0.4	Satisfactorio
0.4 – 0.6	Bueno
0.6 – 0.8	Muy bueno
>0.8	Excelente

FUENTE: Molnar (2011).

$$NSE = 1 - \frac{\sum(m_i - e_i)^2}{\sum(e_i - \tilde{Y})^2}$$

NSE = Estadístico normalizado del error que determina la magnitud relativa del modelo simulado en relación a un modelo de referencia.

$m_i$  = valores medidos en laboratorio

$e_i$  = valor estimado por la ecuación de regresión

$\tilde{Y}$  = valor promedio de la variable independiente



**Error cuadrático medio (ECM):**

Permite identificar la sobreestimación o subestimación de los valores estimados por los modelos de regresión lineal múltiple:

$$ECM = \frac{\sum(m_i - e_i)^2}{N}$$

ECM = error cuadrático medio

$m_i$  = valores medidos en laboratorio

$e_i$  = valor estimado por la ecuación de regresión

N = número de muestra

El rango de valores que puede tomar va desde 0 que indica un ajuste perfecto hasta el infinito positivo que indican un menor ajuste entre los valores observados en laboratorio y los valores estimados por las funciones de edafotransferencia (Cabrera, 2012).

### III. METODOLOGÍA

#### 3.1. Zona de estudio

La presente investigación se realizó en los campos agrícolas de la Universidad Nacional Agraria La Molina.

##### 3.1.1. Ubicación

Latitud: 12°04'55"S

Longitud: 76°56'53"O

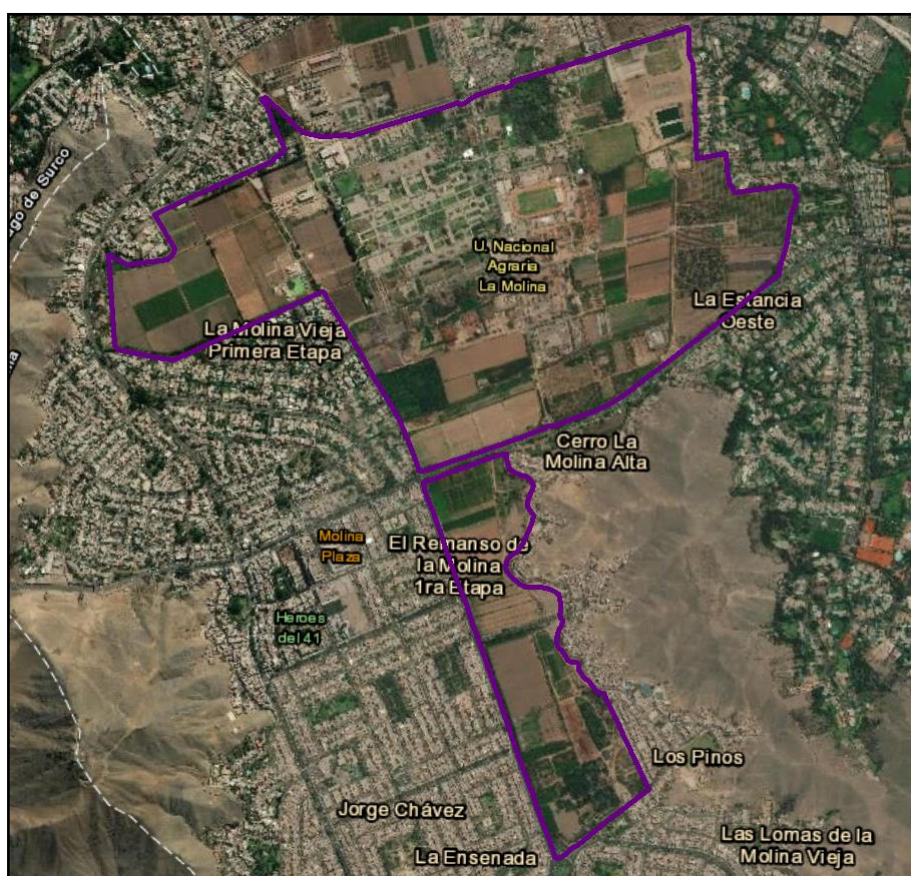


Figura 9: Ubicación geográfica de la UNALM

### **3.1.2. Geografía**

De acuerdo a clasificación de las ecorregiones del Perú, la Universidad Nacional Agraria La Molina se ubica dentro la región Chala que está compuesta de tierras aluviales con suelos finos y arenosos de gran potencia, terrenos aptos para la agricultura y es el lugar que los pobladores prehispánicos irrigaron y dominaron, y donde se asentaron haciendas y fundos agrícolas en las épocas colonial y republicana (CISMID, 2010).

### **3.1.3. Suelos**

La Universidad Nacional Agraria La Molina, según los estudios recopilados el perfil de suelo está constituido predominantemente por suelos arcillosos limosos y arenosos en los estratos superficiales, los cuales llegan hasta 50.00 m de profundidad en promedio. Sin embargo, es de notarse también que conforme se aproxima a las laderas de los cerros se va presentando mayor concentración de material gravoso, probablemente de origen coluvial (CISMID, 2010).

Hoy en día los campos agrícolas siguen siendo aptos para la agricultura, ya que se sigue cultivando y están agrupados de acuerdo a las juntas de usuarios de la UNALM. En estos campos, los suelos han sido trabajados de manera diferente, ya sea por el cultivo o por el uso que se pueda dar y que la dotación de agua no es igual en cada uno de ellos.

## **3.2. Equipos y materiales**

### **3.2.1. Equipos de campo y laboratorio**

- Herramientas de obra civil: pico, lampa, pala, carretilla, barreta
- Se utilizó una pizarra y un plumón para enumerar las calicatas
- Cilindros muestreadores de aluminio de 5cm de diámetro y 5cm de alto
- Anillos muestreadores de plástico de 5cm de diámetro 1 cm de espesor
- Bolsas de plástico para llevar las muestras de suelo al laboratorio
- Mapa de la ubicación de las calicatas en el campus de la UNALM
- Un GPS geodésico para realizar el levantamiento topográfico
- Un GPS para obtener las coordenadas de la ubicación de las calicatas
- Cámara de presión (olla de Richards) y accesorios

- Balanza con aproximación de 0.01 g
- Compresor de aire de 1 a 20 kg/cm<sup>2</sup> con regulador de presión
- Espátula recta y curva
- Tamiz de 2mm
- Vaso de 1000ml

### **3.2.2. Equipo de cómputo y *Software***

- Laptop Core i5
- Software estadístico R, v. 3.6.2, 2019
- Software QGIS v. 3.16, 2020
- Hoja de cálculo Microsoft Excel 2016
- Hoja de documento Microsoft Word 2016

### **3.2.3. Materiales:**

- 77 muestras de suelo
- Papel filtro
- Una caja de ligas
- Agua destilada
- Hilo

### **3.3. Procedimiento**

Para ejecutar adecuadamente el presente trabajo de investigación, se ha contemplado desarrollar en cuatro frases, las cuales son:

- Fase preliminar
- Fase de campo
- Fase de laboratorio
- Fase de análisis estadístico y formulación de modelo

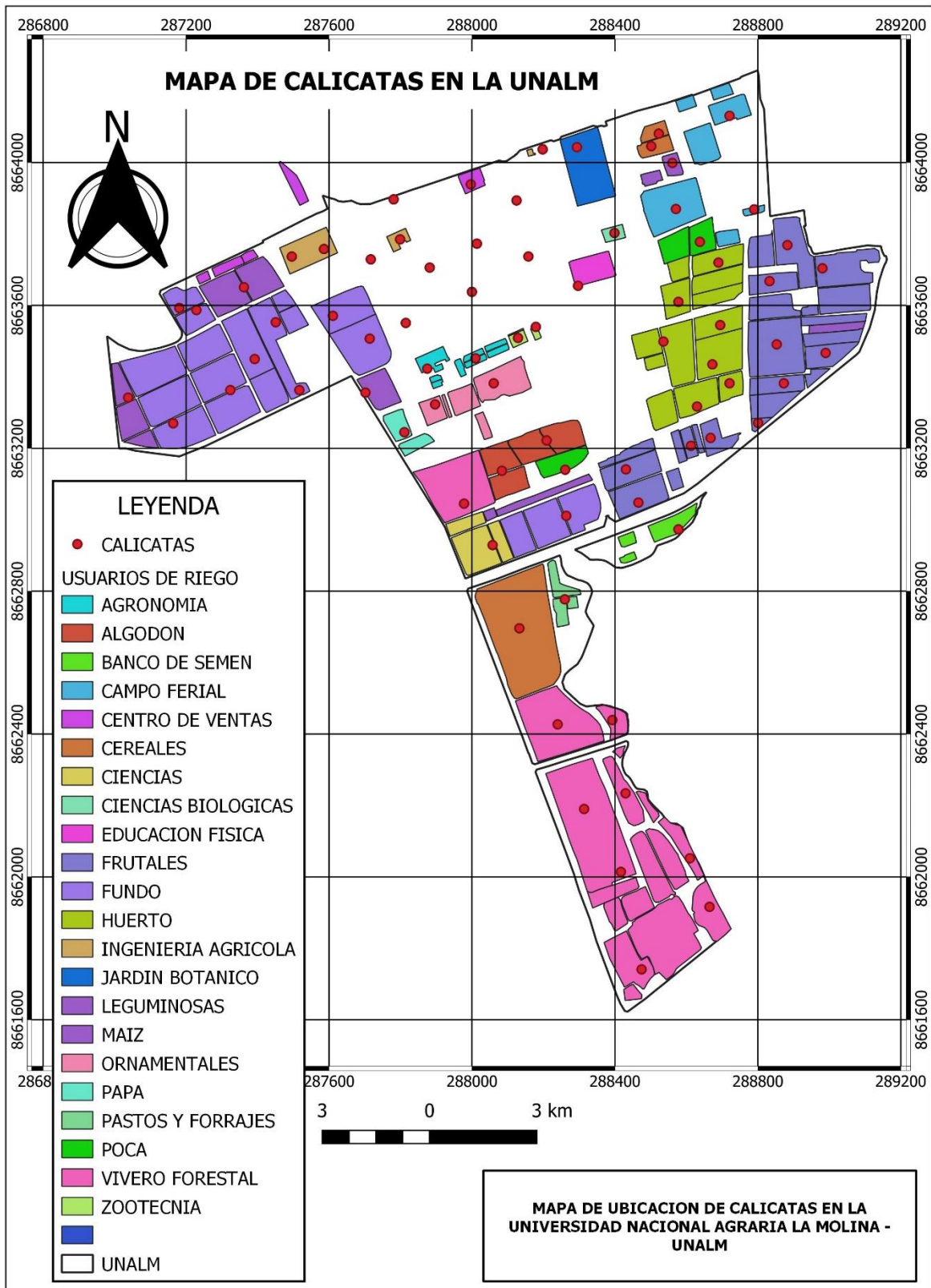
### 3.3.1. Fase preliminar

- **Recopilación de información y uso de SIG:**

Esta fase consistió en el uso de los sistemas de información geográfica – SIG, que permitió desarrollar los diferentes mapas para servir de apoyo en la determinación de puntos de muestreo, tomando como datos de entrada la formación del suelo y los campos agrícolas en la UNALM. Luego de ello se determinó el total de áreas que tienen a su disposición las juntas de usuarios de la UNALM y la ubicación exacta del punto de muestreo de suelos. Se procedió de la siguiente manera:

1. De acuerdo a la información proporcionada por la comisión de regantes de la UNALM, se pudo conocer la cantidad de juntas de usuarios existentes en todo el campus de la universidad, así como las áreas destinadas a cada una de ellas, se coordinó con los jefes encargados de las juntas de usuarios para una entrevista y así sincerar las áreas de cultivo que tienen a su disposición, esto ayudó a determinar el área real y el trabajo que se viene realizando en cada una de ellas Además de contar con un personal autorizado para permitir el ingreso respectivo para realizar las calicatas y que tenga conocimiento del estado del campo y cultivos.
2. Luego del sinceramiento de las áreas de cultivo se realizó un levantamiento topográfico utilizando un equipo GPS geodésico en todos los campos agrícolas que tienen a su disposición las juntas de usuarios, para obtener el total de áreas que están siendo utilizadas o que ya se dejaron de utilizar, este levantamiento sirve para determinar el mapa de ubicación de las juntas de usuarios y la ubicación preliminar de las calicatas.
3. Se realizó la visita a los campos agrícolas con la ayuda de un personal de campo, para conocer el estado actual del campo, ya que había áreas sin cultivar y áreas cultivadas y debido a esto se determinó la ubicación exacta de las calicatas. Además de ello se determinó el uso de maquinaria o mano de obra para poder ingresar al campo y no afectar los cultivos.

4. Se analizó el área de estudio, en función de la edafología, las áreas de cultivo destinadas a cada junta de usuarios y los estudios recopilados del perfil de suelo, determinándose 77 puntos de muestreo, que van a estar distribuidos luego del sinceramiento y el levantamiento topográfico de todos los campos agrícolas. Dada las características similares en cultivo y suelo que presentaban algunos de ellos, se determinó que cada junta de usuarios tenga un número de muestras representativas para todos sus campos agrícolas.
  
5. Luego de replantear en campo la ubicación de las calicatas, se determinó un segundo mapa con la ubicación exacta de las mismas haciendo uso del estado actual del campo, del GPS y del mapa preliminar de calicatas dado por el programa QGIS (Ver Figura 10). Con este nuevo mapa se empezó a realizar la fase campo, que incluye hacer las calicatas y hacer el muestreo de suelos para su posterior análisis en laboratorio.



**Figura 10: Ubicación geográfica de las calicatas en la UNALM**

### 3.3.2. Fase de campo

En esta etapa se realizó las calicatas y el muestreo de suelos, para ello se utilizó la información obtenida en la primera etapa, que es la de conocer la ubicación exacta de las calicatas y conocer el estado de los campos que tienen la junta de usuarios a su disposición, tomando como base la información dada en los diferentes mapas desarrollados en la fase anterior. Además, se debe usar las herramientas de obra civil que son: la pala, carretilla, pico, martillo, cucharón y barreta para hacer la calicata y los materiales que son: bolsas plásticas, pizarra, plumón para ordenar y llevar la muestra al laboratorio de riego y drenaje. El procedimiento se muestra a continuación:

#### 3.3.2.1. Metodología para toma de muestra

1. Utilizando el mapa de junta de usuarios y de la ubicación de las calicatas (Ver Figura 10), se procedió a llegar al lugar exacto de la calicata para empezar con el trabajo.
2. Previa autorización del encargado de campo se verificó si es posible realizar la calicata a mano o la necesidad de una máquina retroexcavadora, dado lo dificultoso que pueda resultar el terreno o la disponibilidad para ingresar a ello.



**Figura 11: Calicata hecho con máquina retroexcavadora y calicata hecha a mano**



3. Las calicatas se realizaron a una profundidad de 1.0 m aproximadamente o hasta que se muestren tres diferentes horizontes de suelo. Luego de ello se procedió a colocar la mira, el letrero y las winchas para realizar el muestreo de suelo.



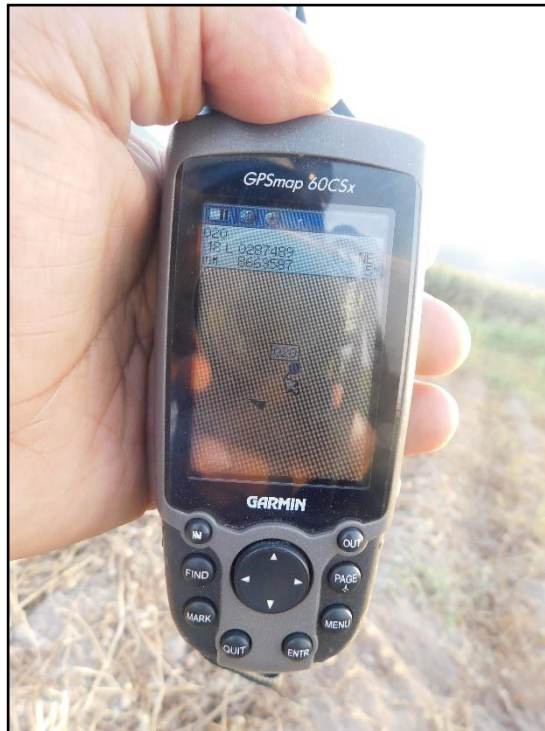
**Figura 12: Calicata con los tres horizontes de suelo**

4. Se utilizó una espátula curva sacar aproximadamente 2 k de suelo por cada horizonte para luego ser llenados en una bolsa plástica con su respectivo rótulo. En algunos campos fue necesario la ayuda de una lampa o pala debido al fuerte estado de compactación del suelo. Se extrajo aproximadamente 2 k, ya que era suficiente para realizar los ensayos de determinación de los parámetros hídricos.



**Figura 13: Recolección de muestras de suelo**

5. La muestra recolectada debe estar rotulada siguiendo un proceso de cadena de custodia, este rótulo debe contener el número y lugar de la calicata. Posteriormente se almacenaron en el laboratorio de riego y drenaje en un lugar fresco y seco para su conservación.
6. Luego de haber realizado la calicata y haber sacado la muestra de suelo se procedió a taparlo para que no perjudique los trabajos diarios que se realizan en campo.
7. Por último, se tomó las coordenadas del lugar de las calicatas con GPS navegador para la ubicación exacta de las mismas.



**Figura 14: Ubicación de las calicatas con GPS**

### **3.3.3. Fase de laboratorio**

En las fases anteriores se definió el área de estudio, así como los mapas y la ubicación exacta de las calicatas, luego en la fase de campo se realizó el muestreo de suelos para luego llegar a esta fase y realizar los siguientes análisis: la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente.

#### **3.3.3.1. Determinación de la capacidad de campo y punto de marchitez**

En el laboratorio de riego y drenaje se realizó se determinó por medio de la olla de Richards la humedad a capacidad de campo y punto de marchitez, esto se pudo conocer debido a que la olla de Richards trabaja a distintas presiones (en bares o PSI), estas presiones van desde 0 bar hasta 15 bar, para el presente estudio es necesario conocer las tensiones de humedad de 0.33 bar y 15 bar que corresponden a campo y punto de marchitez respectivamente.

## **Metodología usando el plato extractor de presión:**

### **Procedimiento:**

La determinación de la humedad a capacidad de campo y punto de marchitez mediante el uso de la olla de Richards, comprendió la utilización de distintas metodologías para cada humedad, primero fue necesario conocer la textura de cada muestra, para así seleccionar que tipo de muestras iba a realizarse en cada ensayo, ya que estas presentaban diferente concentración de arena, limo y arcilla. Esta selección es importante, debido a la concentración diferente de partículas en las muestras, estas hubiesen llegado a la humedad requerida mucho antes de lo estimado, ya que, si se hubiese puesto muestras con diferentes texturas, los resultados del ensayo no habrían sido los correctos.

Con las 77 muestras de suelo presentes en la zona de estudio, se procedió a realizar el ensayo en la olla de Richards. Los procedimientos para determinar la humedad a capacidad de campo y punto de marchitez son distintos, desde la preparación de la muestra, la saturación y la presión ejercida para cada una de ellas. A continuación, se desarrollan ambos procedimientos.

### **Capacidad de campo**

1. Se seleccionó las muestras de suelo que tengan similar cantidad de arena, limo y arcilla, esto con el fin de que la pérdida de humedad sea más o menos uniforme en todas las muestras.
2. Las muestras de suelo seleccionadas se llevan a un tamiz de 2mm y luego con la ayuda de una espátula recta se lleva a los cilindros de metal de 5cm de altura por 4cm de diámetro. Luego, por un extremo del cilindro mediante una liga se sujeta un papel filtro. El cilindro no puede contener cualquier excedente de suelo, este se retira cuidadosamente y se codifica sobre papel filtro para así evitar algún error en el ensayo. Además, estas se tomaron por triplicado para tener un mejor control de las mismas.



**Figura 15: Tamiz de abertura de 2mm**



**Figura 16: Muestras seleccionadas para el ensayo de capacidad de campo**

3. Saturar la placa de cerámica de baja presión y las muestras de suelo con agua destilada para humedecerlas mediante capilaridad durante 24 hrs.



**Figura 17: Saturación de plato y las muestras de suelo por 24 horas**

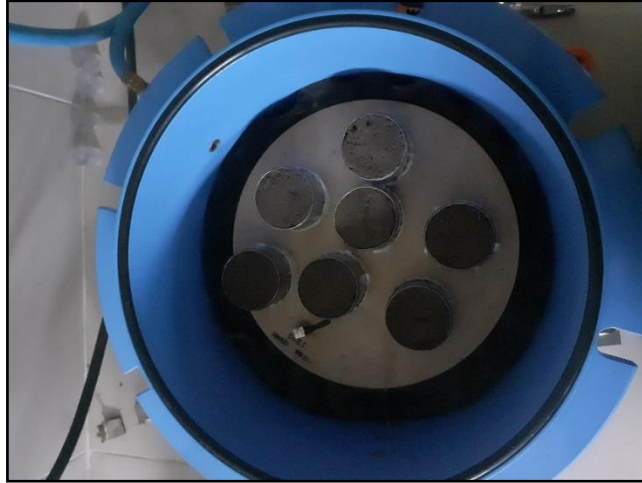
- Una vez saturadas las muestras de suelo, estas se llevan a pesar en la balanza electrónica. Se retira cuidadosamente el papel filtro del cilindro y se coloca una tapa del mismo material del cilindro en el otro extremo de este, luego ese conjunto (tapa, cilindro y suelo) se pesa en la balanza. Una vez pesado, se retira la tapa y se coloca un nuevo papel filtro húmedo en el otro extremo del cilindro, este procedimiento se repite para todas las muestras saturadas.



**Figura 18: Pesado de las muestras saturadas en la balanza**

- Se colocan las muestras saturadas ya pesadas sobre la placa de cerámica y se lleva dentro de la olla a presión de Richards. Además, verificar la salida de agua, esta debe

drenar mediante una manguera que va a estar conectada por un extremo al plato y el otro extremo dará al exterior. Se cierra la olla ajustando la tapa con los tornillos.



**Figura 19: Muestras de suelo ubicadas en la Olla de Richards**

6. Luego de asegurar la tapa, se le aplica una presión de 0.33 bar (correspondientes a capacidad de campo) y comenzará a drenar el excedente de agua hacia el exterior.



**Figura 20: Presión a 0.33 bar para Capacidad de campo**

7. Una vez que finaliza la salida de agua o un mínimo de 48 horas, se retira toda la presión hasta que el manómetro marque 0 bar, se abre la tapa desajustando los tornillos para luego retirar las muestras y pesarlas en la balanza.
8. Antes de pesar las muestras, se retira cuidadosamente el papel filtro, con la ayuda de una espátula recta se retira el suelo que pudo haber quedado atrapado con el papel filtro, luego de ello por el otro extremo del cilindro se coloca una tapa y se lleva a pesar el conjunto (tapa, cilindro y suelo).
9. Por último, se pesan las muestras y se llevan al horno por un tiempo de 24 horas, hasta alcanzar peso constante, una vez pasado ese tiempo se retiran las muestras del horno y se llevan a un decantador.



**Figura 21: Muestras de suelo en el horno**

10. En el decantador permanecen por un tiempo de 20 a 30 min para luego ser pesados en la balanza y obtener la humedad de cada muestra.





**Figura 22: Muestras de suelo en el decantador**



**Figura 23: Pesado de la muestra a 0.33 bar**

### **Punto de marchitez permanente**

1. Para esta parte del ensayo la olla se llamará Cámara de Alta Presión, dado que se trabajará con presiones altas de hasta 15 bar. Antes de ello, se debe saturar el plato de alta presión por un máximo de 24 horas para comenzar con el ensayo.
2. Se seleccionó las muestras de suelo que tengan similar cantidad de arena, limo y arcilla, esto con el fin de que la pérdida de humedad sea más o menos uniforme en

todas las muestras. Además, estas se tomaron por triplicado para tener un mejor control de las mismas. Este paso es el mismo para capacidad de campo.

3. Se tiene 12 anillos de plástico de color blanco de 1 cm de altura por un 5 cm de diámetro, en cada una de ellas se vierte el suelo tamizado, utilizando una espátula y un embudo, esto con la finalidad de que el suelo este enraizado al nivel del anillo.



**Figura 24: Suelo puesto en los anillos el plato de cerámica**

4. Se saturan los anillos con las muestras en un plato saturado, esto con la finalidad de que la muestra tenga una lámina de agua constante. Este procedimiento de saturación en conjunto (plato, anillo y suelo) se mantiene por un tiempo de 12 a 16 horas.



**Figura 25: Saturación del conjunto (plato, anillo y suelo)**

5. Luego de haber saturado todo el conjunto, se retira con una pipeta el exceso de agua que queda en el plato después de la saturación, con la finalidad de que solamente está saturado el plato y las muestras, este procedimiento se realiza con los demás platos de cerámica.



**Figura 26: Platos y muestras saturadas para ser llevados a la cámara de alta presión**

6. Una vez retirada el agua sobrante, se conectan cada plato con su manguera para que pueda drenar el agua después de ejercer presión.
7. Instalados los platos, se procede a cerrar con la tapa y ajustar con los tornillos para una mayor seguridad.
8. La cámara de alta presión se lleva a una presión inicial de 1.5 bar, luego cada 15 min aproximadamente se aumenta la presión en 1.5 bar hasta llegar a los 15 bar que corresponden a la humedad de punto de marchitez. El tiempo que demora cada muestra en llegar al equilibrio es de aproximadamente una semana, dependiendo de la textura del suelo.



**Figura 27: Presión a 15 bar correspondiente a humedad a punto de marchitez**

9. Luego de haber terminado de drenar toda el agua, se retira la tapa de la cámara y se retiran cuidadosamente los platos uno a uno. Con la ayuda de una espátula se procede a pesar cada muestra de cada plato.



**Figura 28: Salida de agua por el tubo**



**Figura 29: Muestras de suelo después de retirar la presión**

10. Una vez retiradas las muestras de la cámara de alta presión (15 bares) y de haber registrado los pesos de las muestras las llevamos a horno a 105°C durante 24 hrs.



**Figura 30: Muestras de suelo puestas en el horno**

11. Por último, pasadas las 24 horas se retira del horno, se pesa y se realiza los cálculos de pérdida de peso (humedad gravimétrica).



**Figura 31: Pesado de las muestras de suelo**

Luego de haber culminado con los ensayos en la olla de Richards, se calcula la humedad a capacidad de campo y punto de marchitez utilizando la ecuación 1 descrita en el siguiente párrafo, esta ecuación determina la humedad gravimétrica de todas las muestras de suelo utilizadas en este ensayo.

$$\% \text{Humedad Gravimétrica} = \frac{\text{peso de suelo húmedo} - \text{peso de suelo seco}}{\text{peso de suelo seco}} \times 100 \quad (\text{ecuación 1})$$

La olla de Richards requiere de metodologías para la determinación de la humedad a capacidad de campo y punto de marchitez, así como la preparación, saturación del plato, las muestras de suelo y el funcionamiento para la presión a 0.33 bar y 15 bar.

### **3.3.4. Fase de análisis estadístico y formulación de modelo**

#### **3.3.4.1. Análisis estadístico**

En esta fase se procedió a formular el modelo matemático mediante el análisis de regresión lineal múltiple para hallar la relación entre los parámetros hídricos y las partículas primarias, basados en la función de edafotransferencia (FET's). Se utilizó una base de datos de 77

muestras de suelo, que fueron los resultados de análisis anteriores llevados a cabo en las fases de campo y laboratorio.

### **Estudio descriptivo**

Consiste en determinar los valores máximos, mínimos, la media, la desviación estándar y la varianza de cada variable, para conocer posibles errores como datos mal introducidos, valores extremos que se alejan demasiado de la media o la identificación de algún dato que influya en la variabilidad de alguna variable. Luego de este análisis se eliminarán aquellos datos que resulten ser extremos y que no tengan cierta lógica con la clase textural que les corresponden a todas las variables.

### **Análisis exploratorio de datos**

El análisis exploratorio, consistió en una primera etapa examinar toda la data que comprende las cantidades de arena, limo y arcilla de cada muestra y los parámetros hídricos (capacidad de campo y punto de marchitez) obtenidos por medio de la olla de Richards, luego de la eliminación de datos extremos.

La utilización de los estadísticos de Kolmogorov-Smirnov (K-S) y Shapiro-Wilk (S-W). permitirá determinar la distribución normal de todas las variables en estudio, ya que si no cumple con esta condición no se puede seguir con el análisis de correlación.

Luego se hizo un análisis de correlación para determinar el grado de asociación entre las variables mediante la correlación lineal simple, esto es muy importante, ya que, si no existe una correlación entre las variables, no se podría decir que la relación entre ellas sea lineal.

#### **3.3.4.2. Regresión lineal múltiple**

En la segunda etapa, se procedió a formular un primer modelo de funciones de edafotransferencia (FET's) para 0.33 bar y 15 bar que son los valores de succión para capacidad de campo y punto de marchitez respectivamente, mediante el análisis de regresión lineal múltiple, en función a las partículas primarias. Mediante la resolución de las ecuaciones normales se determinarán los parámetros de la ecuación de regresión lineal múltiple.

Ecuaciones normales:

$$b_1 \sum x_1^2 + b_2 \sum x_1 x_2 + b_3 \sum x_1 x_3 = \sum x_1 y \quad (\text{ecuación 2})$$

$$b_1 \sum x_1 x_2 + b_2 \sum x_2^2 + b_3 \sum x_2 x_3 = \sum x_2 y \quad (\text{ecuación 3})$$

$$b_1 \sum x_1 x_3 + b_2 \sum x_2 x_3 + b_3 \sum x_3^2 = \sum x_3 y \quad (\text{ecuación 4})$$

$$a = \bar{Y} - b_1 \bar{X}_1 - b_2 \bar{X}_2 - b_3 \bar{X}_3 \quad (\text{ecuación 5})$$

Luego de resolver este sistema de ecuaciones se obtiene los coeficientes de regresión ( $b_1, b_2, b_3$ ) y el valor de la constante  $a$ , para finalmente obtener un primer modelo de función de edafotransferencia de la forma:

$$Y_i = a + b_1 X_{1i} + b_2 X_{2i} + b_3 X_{3i}$$

$Y_i$  = valor de la variable dependiente correspondiente a los parámetros hídricos

$X_{1i}$  = valor de la variable independiente correspondiente a la arcilla

$X_{2i}$  = valor de la variable independiente correspondiente al limo

$X_{3i}$  = valor de la variable independiente correspondiente a la arena

$b_1, b_2, b_3$  = parámetros de la ecuación de regresión lineal múltiple

$a$  = constante en la ecuación de regresión lineal múltiple

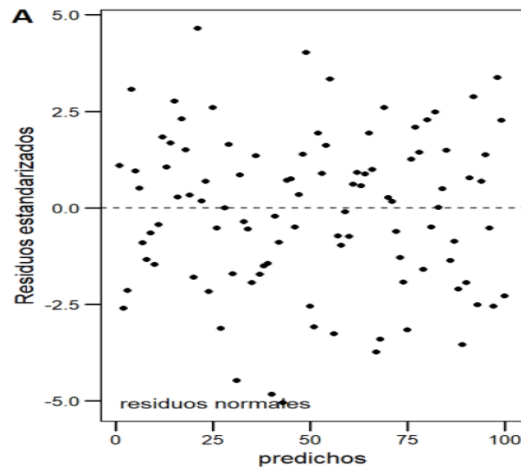
Luego de la determinación de este primer modelo de función de edafotransferencia, se procedió a realizar los diagnósticos de regresión lineal múltiple.

### **Primer diagnóstico de regresión**

Abarca el análisis de los supuestos de regresión lineal múltiple. Estos supuestos incluyen el de linealidad, normalidad y homocedasticidad, en base a los residuos que generan los modelos de capacidad de campo y punto de marchitez. El incumplimiento de estos supuestos puede dar una señal de que el modelo de regresión lineal múltiple no es el adecuado para relacionar los parámetros hídricos con la textura.



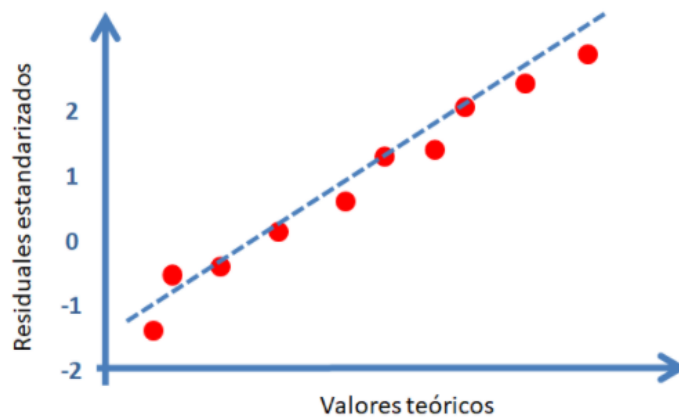
- **Linealidad:** Los valores de la variable dependiente están generados por el siguiente modelo lineal. Mediante una gráfica entre los residuos que generan los modelos contra las variables independientes, lo ideal es que la nube de puntos no tenga un patrón definido



**Figura 32: Linealidad de los residuos**

FUENTE: Andina (2018).

- **Normalidad:** La distribución de la perturbación aleatoria tiene distribución normal, con media de cero y desviación típica de uno. Mediante un histograma de frecuencias sobre los residuos studentizados o una gráfica de probabilidad, se observará en ella, que debe tener una forma acampanada para el caso del histograma o que los puntos deben estar alineados sobre una recta.



**Figura 33: Normalidad de los residuos**

FUENTE: Hernández y Mazo (2020).

- **Homocedasticidad:** Todos los residuos tienen varianza constante. Mediante un gráfico de dispersión entre los residuos tipificados con los valores ajustados de cada modelo, este no debe presentar un patrón definido de puntos, debe mostrarse lo más aleatorio posible.



**Figura 34: Homocedasticidad de los residuos**

FUENTE: Hernández y Mazo (2020).

### Segundo diagnóstico de regresión

- **Análisis de residuos:** Este segundo diagnóstico se realizó mediante el análisis de residuos, para detectar por medio de los residuos studentizados, aquellos valores atípicos presentes en la regresión lineal, esto con la finalidad de eliminar de la data aquellas observaciones que resulten ser atípicas o extremos y tener un mejor ajuste en el modelo. Mediante una gráfica de dispersión de los residuos studentizados con los valores estimados de cada ecuación de regresión van a proporcionar la información necesaria y se podrá apreciar aquellos residuos que tengan valores mayores a 2 y menores a -2, que serán considerados valores atípicos. Los residuos studentizados se calculan de la siguiente manera descrito en la ecuación 6.

$$t_i = \frac{e_i}{S_{R(i)} \times \sqrt{(1-h_{ii})}} \quad (\text{ecuación 6})$$

$t_i$  = residuos studentizados

$e_i$  = residuos cuando los datos son completos

$S_{R(i)}$  = varianza residual calculada sin considerar el i-ésimo caso.

$h_{ii}$  = es el i-ésimo elemento de la diagonal de la matriz H

- **Identificación de observaciones influyentes:** Se realizó mediante la determinación de los valores  $h_{ii}$  que se encuentran en la diagonal de la matriz H, el DFFITS y la distancia de Cook. Estos estadísticos determinan la influencia de cada observación en la: estimación de la variable respuesta, en los valores de las variables independientes y en la estimación de los coeficientes de regresión.

La Influencia (*Leverage*): Observación con un valor extremo para alguno de los predictores. En una representación bidimensional se corresponde con desviaciones en el eje X. Son potencialmente puntos influyentes (Amat, 2016).

Valores de  $h_{ii}$  mayores al valor crítico se considera observación influyente. A continuación, el valor crítico para el *Leverage*.

$$h_{ii} = 2 * \frac{p}{n} \quad (\text{ecuación 7})$$

$h_{ii}$  = es el i-ésimo elemento de la diagonal de la matriz H

$p$  = es el número de parámetros del modelo de regresión lineal múltiple

$n$  = es el número de muestras

DfFITS: Mide el cambio que se produce en el pronóstico de un caso cuando ese caso es eliminado de la ecuación de regresión (De la Fuente, 2011).

$$DfFITS = \frac{e_i}{S_{R(i)} * \sqrt{(1-h_{ii})}} * \sqrt{\frac{h_{ii}}{1-h_{ii}}} \quad (\text{ecuación 8})$$

$DfFITS$  = estadístico de influencia para la variable respuesta

$e_i$  = residuos cuando los datos son completos

$h_{ii}$  = es el i-ésimo elemento de la diagonal de la matriz H

$S_{R(i)}$  = es la varianza residual calculada sin considerar el i-ésimo caso.

Distancia de Cook: Mide el cambio que se produce en las estimaciones de los coeficientes de regresión al ir eliminando cada caso de la ecuación de regresión. Una distancia de Cook grande indica que ese caso tiene un peso considerable en la estimación de los coeficientes de regresión (De la Fuente, 2011).

$$D_i = \left[ \frac{e_i}{\sqrt{S^2_{R^*}(1-h_{ii})}} \right]^2 \times \frac{h_{ii}}{1-h_{ii}} \times \frac{1}{p} \quad (\text{ecuación 9})$$

$D_i$  = estadístico de influencia en la estimación de los coeficientes de regresión

$e_i$  = residuos cuando los datos son completos

$h_{ii}$  = es el i-ésimo elemento de la diagonal de la matriz H

$p$  = el número de variables independientes

$S^2_R$  = la varianza residual

Valores de distancia de Cook mayores a 1 se consideran observaciones influyentes.

Por último, luego de haber depurado algún valor atípico o influyente, se procedió a formular un segundo modelo de FET's mediante regresión lineal múltiple, en cada una de las FET's, se tomó a las tres variables independientes tales como la arena, el limo y la arcilla

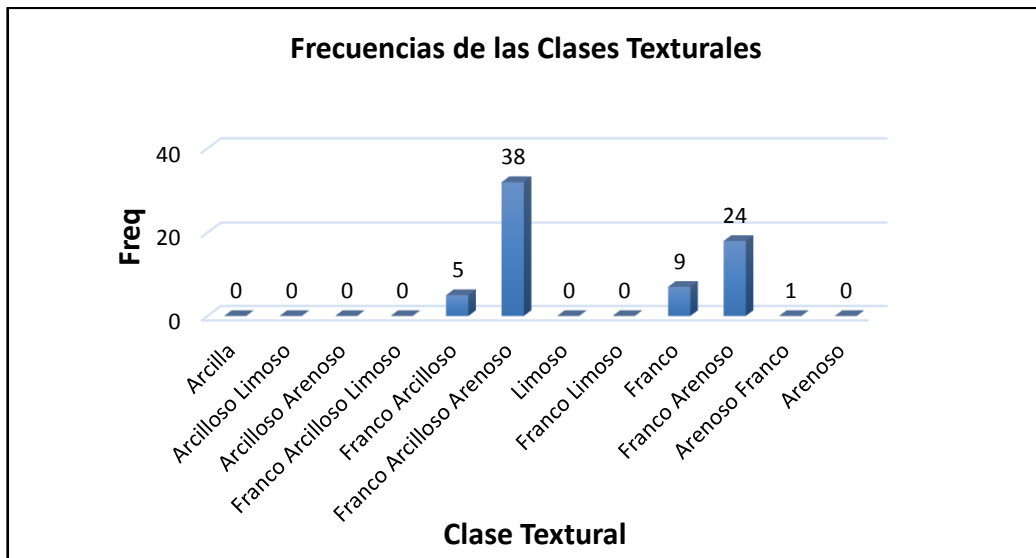
Una vez determinados los modelos de FET's, éstos son validados mediante estadísticos de evaluación como: raíz del error cuadrático medio (RECM), Índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) y el  $R^2$  entre los resultados de capacidad de campo y punto de marchitez, procedentes del análisis en la olla de Richards y los valores estimados a través de los modelos generados. Esta validación se realizó para determinar el grado de precisión y el ajuste de los datos observados en laboratorio con la ecuación de regresión lineal múltiple y así determinar la confiabilidad de las FET's.

## **IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **4.1. Análisis textural**

Se observa en la Figura 35 que la clase textural predominante es la Franco Arcilloso Arenoso con 38 casos, es importante este dato, ya que representa más del 50% de toda la data y al igual que los demás datos, las muestras de suelo en conjunto muestran un tipo de suelo con textura moderadamente gruesa. Esta información se corrobora con la proporcionada por la formación geomorfológica de la zona de estudio donde se manifiesta que dicha zona presenta un suelo Arenoso arcilloso.

En el Figura 35, se observa 5 clases texturales existentes en las muestras de suelo en comparación con las 12 clases texturales que existen en la actualidad y que se pueden encontrar en el suelo, ellos son; 1 Arena franca, 9 Francos, 24 Franco arenoso, 5 Franco arcilloso y 38 Franco arcilloso arenoso, completando un total de 77 muestras de suelo. La composición de cada muestra de suelo tiene aproximadamente en cada una de ellas al menos 50 % arena, 25 % de limo y 25 % de arcilla. La variable arena es la se encuentra en mayor cantidad en cada muestra de suelo, y es probable que la determinación de la humedad sea relativamente baja. Además, de su influencia en la estimación de la ecuación de regresión lineal múltiple. Algunas muestras de suelo llegan al equilibrio mucho antes que otras, dado que la arena deja pasar con más facilidad el agua y eso influye en el resultado de la humedad. El limo y la arcilla por el tipo de textura y estructura que poseen ayudan a mejorar la capacidad hídrica de estos suelos, aunque puede verse afectado por otras propiedades físicas que están presentes en ellos.



**Figura 35: Gráfico de frecuencias de las clases texturales de suelo**

El análisis en el triángulo textural se basó en el sistema de clasificación de USDA, este análisis permitió conocer la clase textural de todos los suelos de la UNALM, según la cantidad de tipo de suelo que tenían. Estos suelos presentan en su mayoría una textura franco arcilloso arenoso con una tendencia a franco arenoso, esto debido a la formación geológica perteneciente al área de estudio. Así pues, estos suelos son un poco difíciles para la agricultura, aunque desde hace varios siglos se viene trabajando en ello para que el suelo tenga un alto nivel de fertilidad.

En la Figura 36 se observa el triángulo textural que permite identificar las clases texturales de todas las muestras de suelo que se tiene en el laboratorio.

Este triángulo es muy importante, ya que permite identificar la clase textural de cualquier suelo teniendo los porcentajes de arcilla, limo y arena que la componen. Además, se puede observar la distribución de las muestras, algunas de ellas se encuentran más dispersas y otras están más concentradas en una misma clase textural. Sin embargo, todas ellas tienen una cantidad considerable de arena, que es la que predomina en todas muestras de suelo.

## Triángulo Textural según clasificación USDA

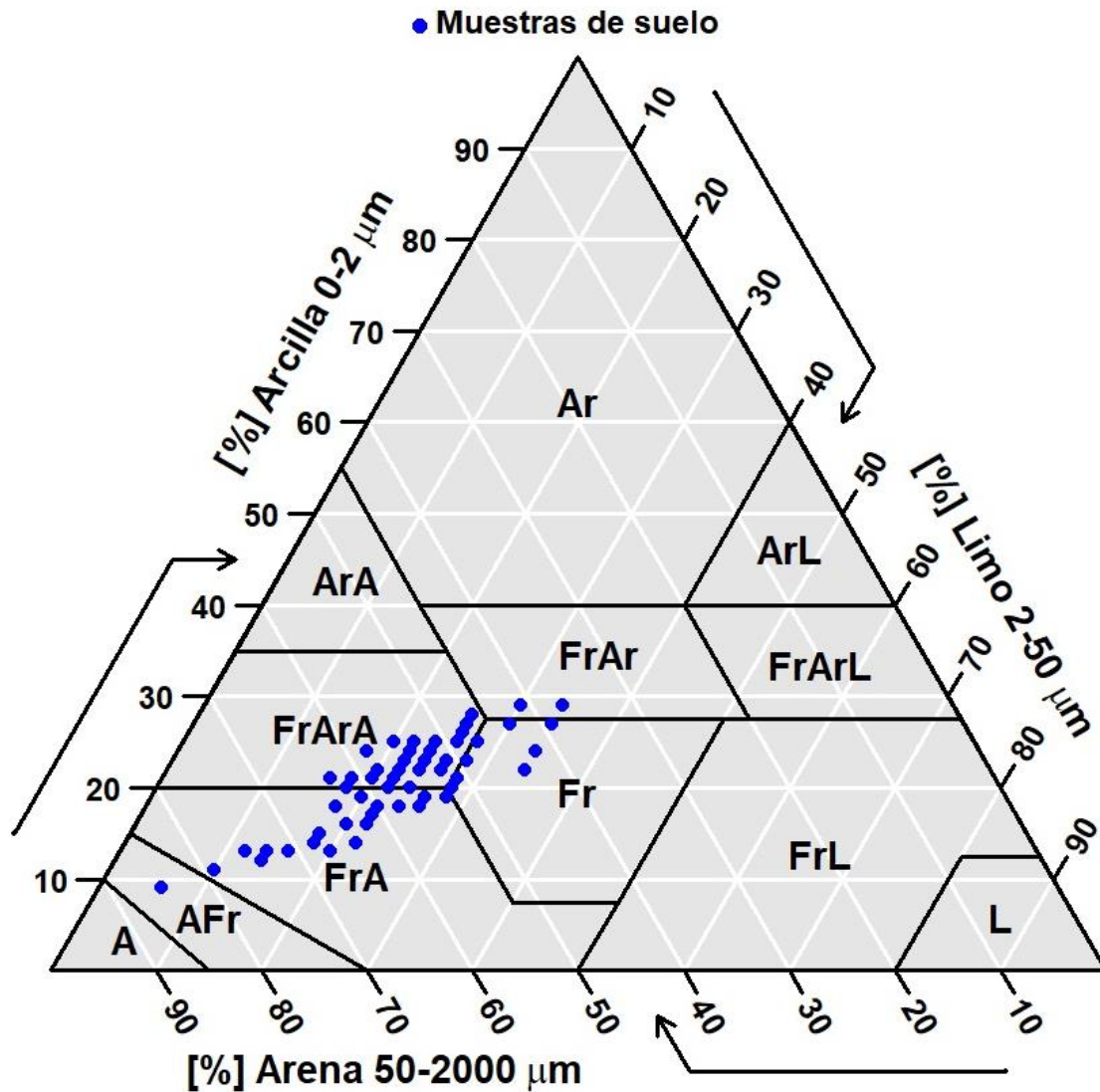


Figura 36: Identificación de la clase textural de los suelos de la UNALM

### 4.2. Capacidad de campo y punto de marchitez

El cálculo de la humedad a capacidad de campo y punto de marchitez se determinaron mediante la fórmula de la humedad gravimétrica descrita en la ecuación 1, luego de obtener los resultados del análisis realizado en la olla de Richards.

Luego de obtener los contenidos de humedad de las muestras de suelo, se procedió a realizar un análisis estadístico de los mismos, para verificar que estos no se muestren muy dispersos, para ello se utilizó el diagrama de cajas.

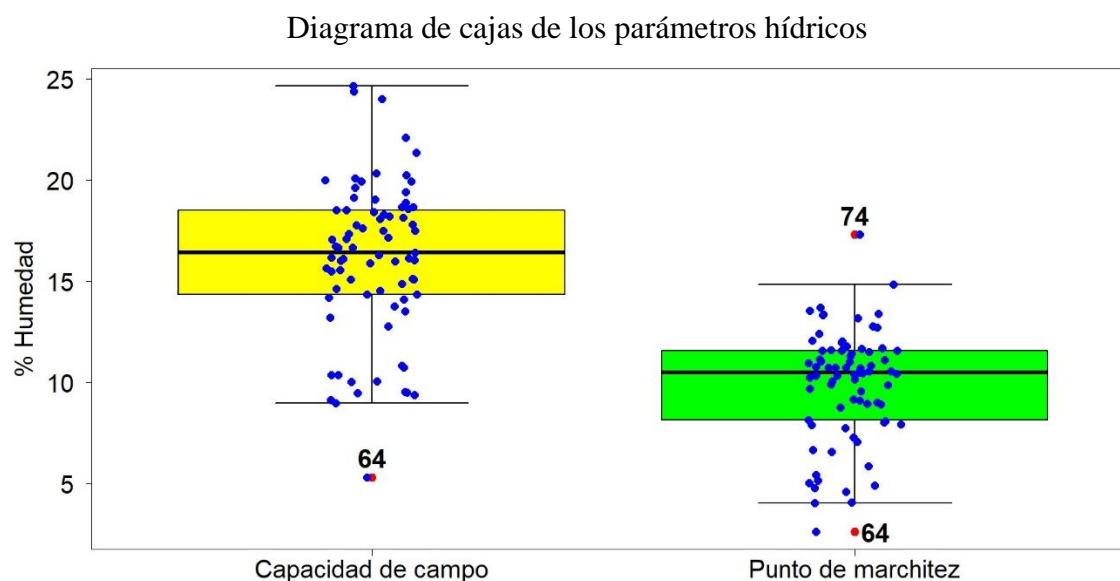
Se observa en el Figura 37, el diagrama de cajas para los contenidos de humedad a capacidad de campo y punto de marchitez, mostrándose en ella las muestras de suelo, representado por puntos azules y los valores atípicos que resultaron luego del ensayo en la olla de Richards. Para ambas humedades la observación n°64 es atípica, además de la observación n°74 para punto de marchitez. De acuerdo a las clases texturales presentes en las muestras de suelo, la observación n°64 es arenoso y la n°74 es franco arcilloso. La muestra arenosa presentó un 85% de arena, que en consecuencia obtuvo una humedad muy baja, la muestra franco arcillosa presentó porcentajes similares de arena, limo y arcilla, lo que conllevó a una humedad muy alta y muy alejada del resto.

Para la humedad de capacidad de campo, la parte superior de la caja es igual que la parte inferior; ello quiere decir que la humedad comprendida entre el 25 % y el 50 % tiene la misma concentración de muestras que entre el 50 % y 75 %. El bigote inferior ( $X_{\text{mín}}$ ,  $Q_1$ ) tiene casi el mismo tamaño que el superior; por ello la concentración de humedad es más o menos similar para el 25% inferior y 25 % superior. El rango intercuartílico indica que el 50% de las muestras está comprendido entre el 14.34 % y 18.60 % de humedad.

Para la humedad de punto de marchitez, la parte superior de la caja es menor que la parte inferior; ello quiere decir que la humedad comprendida entre el 50 % y el 75 % de las muestras está más concentrados que entre el 25 % y 50 %. El bigote inferior ( $X_{\text{mín}}$ ,  $Q_1$ ) es más largo que el superior; por ello el 25 % menor está más disperso que el 50 % superior. El rango intercuartílico indica que el 50% de las muestras está comprendido entre el 08.15 % y 11.58 %.

Por medio del diagrama de cajas se determinó que los contenidos de humedad de los parámetros hídricos presentan una ligera dispersión. Además de la existencia de datos atípicos que sobresalen del diagrama de cajas para ambos parámetros hídricos. Esto da un indicio de que determinadas muestras de suelo, no solo las atípicas, si no, las que se encuentran dispersas pueden estar actuando a favor o en contra en la estimación de la ecuación de regresión lineal múltiple, pero en general los resultados del análisis en la olla de Richards fueron bastantes buenos y aceptables.





**Figura 37: Diagrama de cajas para capacidad de campo y punto de marchitez**

### 4.3. Análisis estadístico

#### 4.3.1. Estudio descriptivo

La siguiente Tabla 8, presenta la recopilación de las 77 muestras de suelo de los campos agrícolas de la UNALM, después del análisis del laboratorio, en ella se observa que el promedio de la humedad a capacidad de campo y punto de marchitez es de 16.10% y 9.84% respectivamente.

Los porcentajes de humedad a capacidad de campo fluctúa entre 24.66% y 5.30%, y los de punto de marchitez fluctúa entre 17.31% y 2.61%. Estos porcentajes de humedad varían de acuerdo al tipo de cultivo, al manejo y a la textura presente en cada suelo. Estos bajos valores de humedad presentes en la zona de estudio, demuestran el poco uso que se le está dando al campo, más aún cuando la mayoría de los suelos son de naturaleza arenoso arcilloso. Estos suelos son un poco difíciles de manejar, dado su naturaleza. Sin embargo, haciendo un uso racional del agua y manteniendo un buen manejo del suelo, se puede convertir en un suelo muy productivo y apto para la agricultura.

Las cantidades promedio de arena, limo y arcilla son: 56.71%, 22.75% y 20.53% respectivamente, lo que demuestra una cantidad predominante de la arena en la mayoría de las muestras analizadas. Las cantidades de limo y arcilla también son importantes, ya que

esta fracción de suelo ayuda a retener el agua dentro del suelo, ayudado por otras propiedades físicas que puedan estar presentes en el suelo.

Dada la considerable cantidad de arena por muestra de suelo, la humedad a capacidad de campo y punto de marchitez es relativamente bajo, lo que refleja que para dicho contenido de humedad representa una clase textural de franco arcilloso arenoso, que es la textura predominante en todas las muestras de suelo analizadas. El hecho de que la cantidad de arena por muestra sea mayor que el limo y la arcilla, da un indicio de que, en la ecuación de regresión lineal múltiple, el parámetro que acompaña a dicha variable sea muy pequeño e influya poco en la estimación de la humedad.

**Tabla 8: Serie de datos de las 77 muestras de suelo según las partículas primarias y los parámetros hídricos**

N° Muestra	Partículas primarias del suelo			Humedad gravimétrica	
	(%) arena	(%) limo	(%) arcilla	(%) Hcc	(%) Hpm.
1	62.00	18.00	20.00	14.88	11.04
2	54.00	22.00	24.00	17.50	9.00
3	52.00	28.00	20.00	18.68	10.74
4	44.00	34.00	22.00	18.16	11.58
5	44.00	34.00	22.00	20.34	11.58
6	58.00	24.00	18.00	15.10	10.05
7	54.00	24.00	22.00	20.01	10.75
8	42.00	34.00	24.00	20.25	11.58
9	56.00	26.00	18.00	14.11	9.16
10	60.00	22.00	18.00	13.78	10.69
11	52.00	28.00	20.00	18.44	11.61
12	58.00	22.00	20.00	16.15	10.48
13	56.00	24.00	20.00	18.88	11.56
14	52.00	24.00	24.00	19.63	13.56
15	48.00	26.00	26.00	22.11	10.96
16	54.00	24.00	22.00	18.60	11.42
17	58.00	24.00	18.00	13.53	8.75
18	56.00	22.00	22.00	15.10	10.44
19	64.00	22.00	14.00	15.56	5.85
20	68.00	18.00	14.00	10.38	6.65
21	56.00	26.00	18.00	16.41	11.11
22	74.00	14.00	12.00	9.46	4.90
23	64.00	20.00	16.00	10.74	8.08
24	62.00	18.00	20.00	15.90	11.00
25	64.00	18.00	18.00	17.81	11.97
26	52.00	24.00	24.00	17.51	12.78
27	62.00	18.00	20.00	15.12	9.88
28	64.00	20.00	16.00	12.77	7.27
29	62.00	22.00	16.00	9.49	4.04
30	48.00	26.00	26.00	19.14	12.05
31	58.00	18.00	24.00	14.34	8.91
32	62.00	18.00	20.00	13.20	9.11
33	46.00	26.00	28.00	19.96	12.71
34	54.00	24.00	22.00	16.72	10.34
35	52.00	26.00	22.00	17.77	11.52
36	56.00	22.00	22.00	16.11	9.70
37	54.00	24.00	22.00	16.17	11.29
38	54.00	24.00	22.00	15.51	9.90
39	52.00	24.00	24.00	17.06	10.74
40	58.00	20.00	22.00	14.35	10.55

«Continuación»

41	49.00	26.00	25.00	18.67	10.55
42	37.00	34.00	29.00	19.96	13.40
43	47.00	26.00	27.00	19.05	10.76
44	51.00	24.00	25.00	15.99	11.67
45	57.00	22.00	21.00	14.62	8.95
46	51.00	28.00	21.00	16.31	8.15
47	61.00	20.00	19.00	14.19	7.89
48	59.00	20.00	21.00	17.15	10.32
49	57.00	22.00	21.00	17.34	11.69
50	55.00	22.00	23.00	18.30	13.70
51	55.00	20.00	25.00	17.64	11.79
52	53.00	24.00	23.00	16.67	10.39
53	49.00	28.00	23.00	20.11	9.55
54	53.00	28.00	19.00	15.64	10.16
55	47.00	28.00	25.00	19.43	11.13
56	73.00	14.00	13.00	8.99	5.15
57	63.00	16.00	21.00	14.54	7.91
58	67.00	18.00	15.00	10.35	6.56
59	53.00	22.00	25.00	16.67	8.02
60	67.00	20.00	13.00	10.83	7.05
61	71.00	16.00	13.00	10.04	5.43
62	79.00	10.00	11.00	9.13	4.07
63	51.00	28.00	21.00	24.04	14.84
64	85.00	6.00	9.00	5.30	2.61
65	75.00	12.00	13.00	9.54	4.60
66	73.00	14.00	13.00	9.38	5.03
67	53.00	28.00	19.00	18.08	10.82
68	75.00	12.00	13.00	10.06	4.76
69	61.00	18.00	21.00	16.01	10.23
70	61.00	22.00	17.00	16.06	7.74
71	51.00	26.00	23.00	18.51	13.32
72	41.00	30.00	29.00	21.36	13.17
73	53.00	22.00	25.00	18.51	13.37
74	39.00	34.00	27.00	24.66	17.31
75	51.00	24.00	25.00	24.41	12.03
76	43.00	30.00	27.00	18.23	12.40
77	55.00	26.00	19.00	17.10	10.47
<b>Max</b>	85	34	29	24.66	17.31
<b>Min</b>	37	6	9	5.3	2.61
<b>Promedio</b>	56.71	22.75	20.53	16.10	9.84
<b>Desv. Est</b>	9.24	5.55	4.48	3.85	2.81
<b>Varianza</b>	85.29	30.85	20.04	14.86	7.88

### 4.3.2. Análisis exploratorio de datos

Para este análisis se eliminaron cuatro muestras de suelo (42, 62, 64 y 76), ya que presentaban valores extremos y atípicos tanto en textura como en los parámetros hídricos.

#### 4.3.2.1. Distribución normal

La distribución normal de los datos se realizó mediante los test de KolmogorovSmirnov (K-S) y Shapiro Wilk.

En la Tabla 9 se muestra las pruebas de normalidad realizada a todas las variables en estudio, se observa que todas presentan una distribución normal y muestran valores significativos. Por lo tanto, al estar demostrado la normalidad de las variables se prosigue con el análisis de correlación lineal de Pearson.

**Tabla 9: Pruebas de normalidad de Kolmogorov-Smirnov y Shapiro Wilk**

Prueba	Kolmogorov-Smirnov		Shapiro Wilk	
	Variable	Estadístico	Significancia	Estadístico
Arena	0.099	0.072	0.977	0.094
Limo	0.112	0.030	0.968	0.053
Arcilla	0.111	0.030	0.966	0.030
Capacidad de campo	0.084	0.229	0.964	0.038
Punto de marchitez	0.115	0.018	0.967	0.058

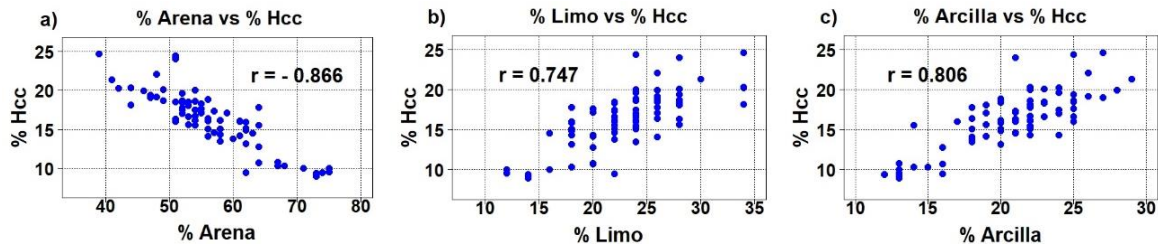
#### 4.3.2.2. Correlación lineal

Se procedió a determinar el grado de asociación de las partículas primarias (arena, limo, arcilla) respecto a la capacidad de campo y al punto de marchitez mediante el análisis de la correlación con las 73 muestras de suelo.

En la Figura 38 se aprecia la matriz de dispersión textura vs capacidad de campo, en ella se observa; que el gráfico 38a, indica que la relación existente entre la arena y capacidad de campo tiene un coeficiente de correlación negativo de  $\rho = - 0.866$ , el gráfico 38b, indica la relación existente entre el limo y capacidad de campo, se observa un coeficiente de correlación positivo de  $\rho = 0.747$ . Por último, el gráfico 38c, indica la relación existente entre la arcilla y capacidad de campo, se observa un coeficiente de correlación positivo de  $\rho = 0.806$ . Las 3 correlaciones realizadas muestran una gran asociación entre las variables

independientes y dependientes, mientras que la arena lo hace negativamente, la arcilla y el limo lo hacen positivamente. Además, se observa una tendencia lineal de los puntos en cada uno de los gráficos, con alto coeficiente de correlación lineal.

### Gráficos de dispersión para capacidad de campo

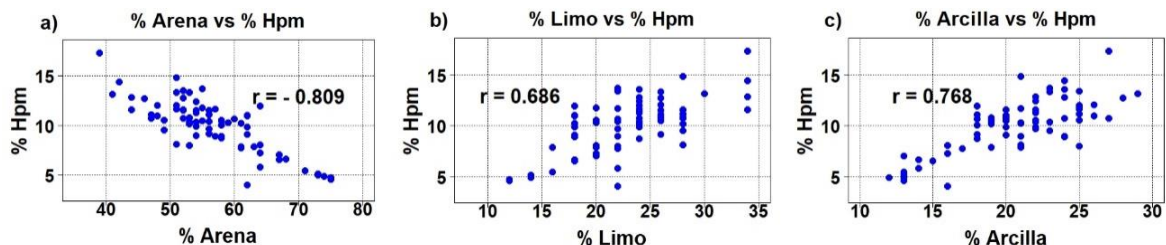


**Figura 38: Gráficos de dispersión entre Textura y Capacidad de campo**

*Nota.* a) Arena vs Hcc, b) Limo vs Hcc, c) Arcilla vs Hcc

En la Figura 39 se observa la matriz de dispersión textura vs punto de marchitez, en ella se observa; que el gráfico 39a, indica la relación existente entre la arena y punto de marchitez, tiene un coeficiente de correlación negativo de  $\rho = -0.809$ , el gráfico 39b, indica la relación existente entre el limo y punto de marchitez, se observa un coeficiente de correlación positiva de  $\rho = 0.686$ . Por último, el gráfico 39c, indica la relación existente entre la arcilla y punto de marchitez, se observa un coeficiente de correlación positivo de  $\rho = 0.768$ . Las 3 correlaciones realizadas muestran una gran asociación entre el punto de marchitez y la textura, mientras que la arena lo hace negativamente, la arcilla y el limo lo hacen positivamente. Además, se observa una tendencia lineal de los puntos en cada uno de los gráficos, con un alto coeficiente de correlación lineal.

### Gráficos de dispersión para punto de marchitez



**Figura 39: Gráficos de dispersión entre Textura y Punto de marchitez**

*Nota.* a) Arena vs Hpm, b) Limo vs Hpm, c) Arcilla vs Hpm

Los gráficos de las figuras 38 y 39 muestran una fuerte correlación entre las partículas primarias y los parámetros hídricos, siendo la mayor correlación para ambos casos con la arena. Esta correlación es cruzada, ya que mientras la arena mantiene una relación inversa, el limo y la arcilla lo hacen directamente con cada uno de los parámetros hídricos.

Se corrobora entonces que los suelos arenosos no contribuyen a mejorar la capacidad de retención hídrica en los suelos de la UNALM, altos porcentajes de arena y poca humedad, mientras que los suelos limosos y arcillosos ayudan significativamente a mejorar dicha capacidad. No obstante, la mejora de la capacidad de retención hídrica no solo está determinado por la textura, sino que, otras propiedades físicas pueden estar actuando a favor o en contra de dicha capacidad.

En este análisis se demostró que existe una gran correlación entre las partículas primarias y los parámetros hídricos, ya que, si no se demuestra la relación lineal entre ellas, no se podría estimar las funciones de edafotransferencia con la regresión lineal múltiple.

#### **4.4. Regresión lineal múltiple**

Se determinó un primer modelo regresión lineal múltiple, obteniéndose los parámetros de regresión y el coeficiente de determinación  $R^2$ . A continuación, se presentan los siguientes análisis para obtener la ecuación de regresión.

#### **Modelo de humedad a capacidad de campo**

La Tabla 10 muestra el análisis de varianza para el modelo de capacidad de campo y su correspondiente valor de  $R^2$ .

**Tabla 10: ANOVA para capacidad de campo**

<b>Variación</b>	<b>Suma Cuadrados</b>	<b>Grados libertad</b>	<b>Media cuadrática</b>	<b>F - Snedecor</b>
Explicada	719.22	3	239.74	73.76
Residual	224.25	69	3.25	
Total	943.46	72		

Para el modelo de capacidad de campo, se obtiene un  $R^2$  de 0.7623, lo que representa que un 76.23% de la variabilidad total es explicada en el modelo.

Luego de resolver las ecuaciones normales descritas en las ecuaciones 2, 3, 4, 5, se obtuvo los parámetros de la ecuación de regresión estos son: 0.474 para el porcentaje de arcilla(Ar), 0.284 para el porcentaje de limo(L) y -0.024 para el porcentaje de arena(A) y el valor de la constante a que es 1.31. La ecuación para el modelo de capacidad de campo es la siguiente:

$$C.C. (\%) = 0.474 * \%Ar + 0.284 * \%L - 0.024 * \%A + 1.31$$

C.C. (%) = Humedad gravimétrica a capacidad de campo

%A = Porcentaje de arena, expresado en humedad gravimétrica

%L = Porcentaje de limo, expresado en humedad gravimétrica

%Ar = Porcentaje de arcilla, expresado en humedad gravimétrica

### Modelo de humedad a punto de marchitez

La Tabla 11 muestra el análisis de varianza para el modelo de punto de marchitez y su correspondiente valor de  $R^2$ .

**Tabla 11: ANOVA para punto de marchitez**

Variación	Suma Cuadrados	Grados libertad	Media cuadrática	F - Snedecor
Explicada	333.09	3	111.03	45.50
Residual	168.19	69	2.44	
Total	501.28	72		

Para el modelo de punto de marchitez, se obtiene un  $R^2$  de 0.6645, lo que representa que un 66.45 % de la variabilidad total es explicada en el modelo.

Luego de resolver las ecuaciones normales se obtuvo los parámetros de la ecuación de regresión estos son: 0.316 para el porcentaje de arcilla(Ar), 0.154 para el porcentaje de limo(L) y -0.040 para el porcentaje de arena(A) y el valor de la constante a que es 2.30. La



ecuación para el modelo de punto de marchitez es la siguiente:

$$P.M. (\%) = 0.316 * \%Ar + 0.154 * \%L - 0.040 * \%A + 2.30$$

P.M. (%) = Humedad gravimétrica a punto de marchitez

%A = Porcentaje de Arena, expresado en humedad gravimétrica

%L = Porcentaje de Limo, expresado en humedad gravimétrica

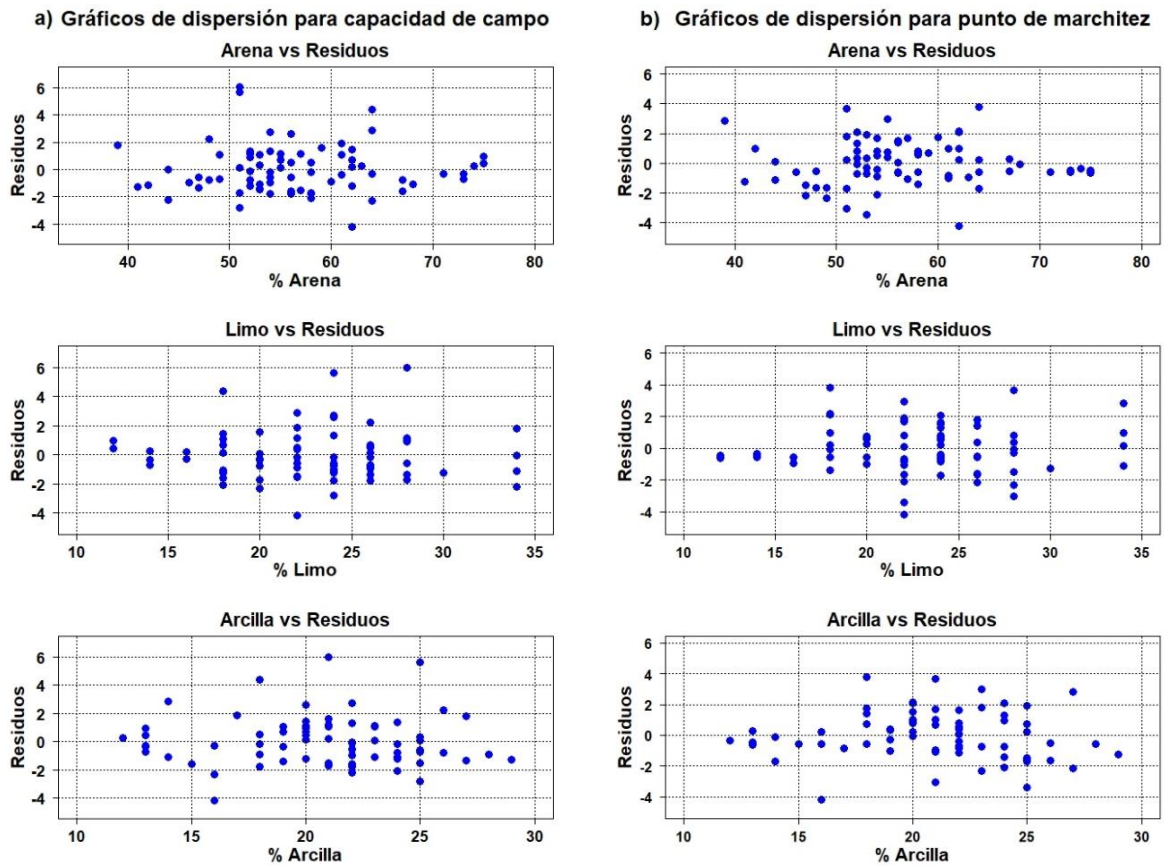
%Ar = Porcentaje de Arcilla, expresado en humedad gravimétrica

#### **4.4.1. Supuestos de la regresión lineal múltiple**

A continuación, se presentan los análisis de los principales supuestos de la regresión lineal múltiple para cada modelo de capacidad de campo y punto de marchitez.

##### **4.4.1.1. Linealidad**

Se observa en la Figura 40 las gráficas de dispersión para capacidad de campo y punto de marchitez, en ellas se observa los residuos generados por los modelos de regresión lineal múltiple con las variables independientes, lo ideal es que ambas gráficas presenten una estructura aleatoria de puntos. Estas gráficas se utilizan para detectar problemas de no linealidad y otros.



**Figura 40: Gráficos de dispersión de cada variable independiente con los residuos**

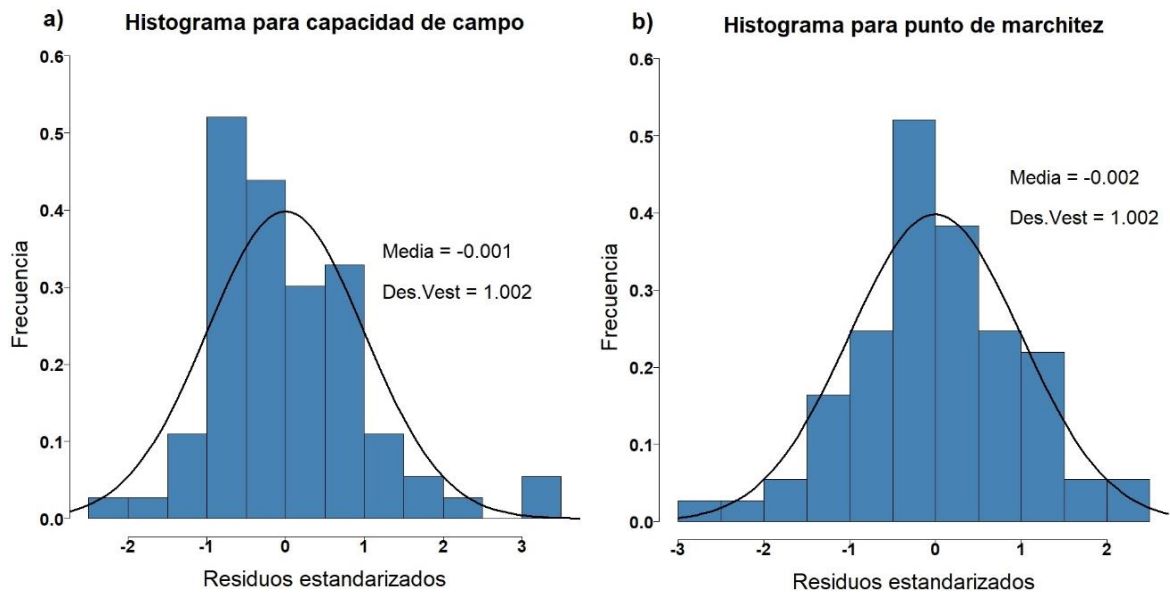
*Nota.* Para: a) Capacidad de campo y b) Punto de marchitez

#### 4.4.1.2. Normalidad

Para cada valor de la variable independiente (o combinación de valores de las variables independientes), los residuos se distribuyen normalmente con media cero.

En la Figura 41, se observa el gráfico 41a, que el histograma acumula más casos en la parte de la izquierda de los que existen en una curva normal. Y en el gráfico 41b, se observa que el histograma acumula más casos en la parte de la central de los que existen en una curva normal. Aun así, cumplen con este supuesto, ya que los residuos generados por ambos modelos de regresión presentan una media de cero y desviación estándar de 1.

Probablemente este resultado no sea tan exacto, ya que puede deberse a algunos valores atípicos que pueden estar generando esa imprecisión.



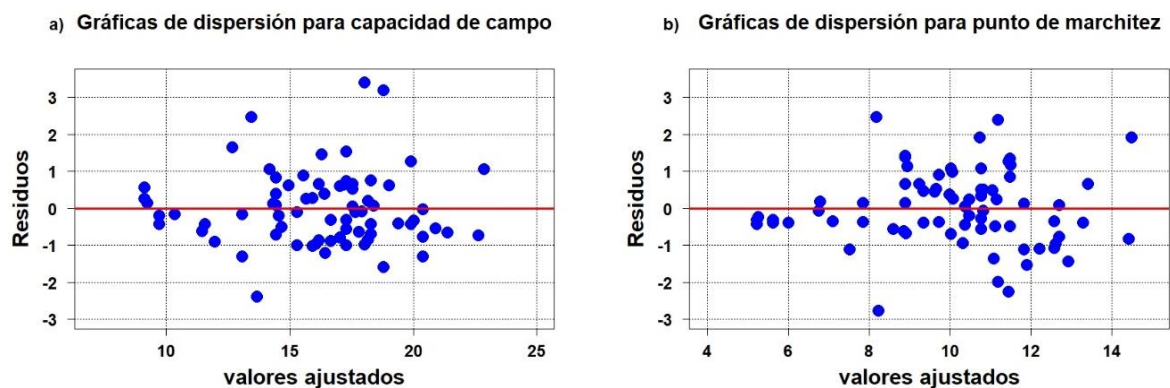
**Figura 41: Histograma de residuo estandarizado**

*Nota.* a) Capacidad de campo, b) Punto de marchitez

#### 4.4.1.3. Homocedasticidad

Para cada valor de la variable independiente (o combinación de valores de las variables independientes), la varianza de los residuos es constante.

En la Figura 42 los puntos en cada gráfica están lo más disperso sin tener alguna tendencia con respecto al cero. Se puede observar también que algunos residuos están un poco alejados del conjunto de datos, lo que conlleva a visualizar algunos datos atípicos que pueden afectar la predicción de los modelos.



**Figura 42: Gráficos de dispersión de residuo estandarizado con el valor estimado**

*Nota.* Para: a) Capacidad de campo y b) Punto de marchitez

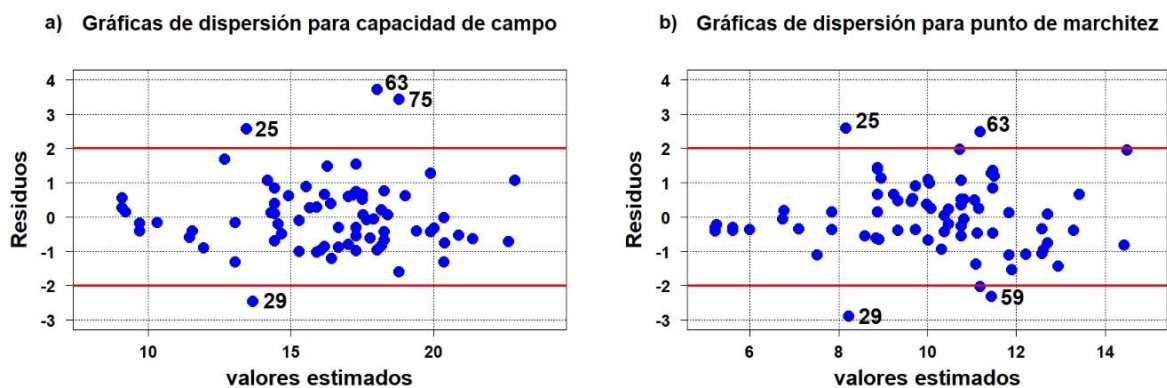
Se cumplieron los supuestos de regresión lineal múltiple: la linealidad, la homocedasticidad y la normalidad de los residuos. Todos ellos con buenos ajustes y bastante aceptables. Los únicos supuestos que no formaron parte del análisis son la independencia de errores que no fue relevante ya que los datos no provenían de series temporales y la multicolinealidad que no influyó en la estimación de los coeficientes de regresión ni en la predicción de los parámetros hídricos. El cumplimiento de estos supuestos da una señal de que el modelo de regresión lineal múltiple es el adecuado para relacionar los parámetros hídricos con las partículas primarias.

#### 4.4.2. Identificación de valores atípicos y observaciones influyentes

Es importante tener en cuenta que valor atípico o valor influyente se va a depurar, ya que no necesariamente todas las observaciones que resulten de estos análisis deben ser excluidos de la serie de datos.

##### 4.4.2.1. Análisis de residuos

En la Figura 43, se observa las gráficas de dispersión que relaciona los valores estimados con los residuos studentizados para cada parámetro hídrico, en ella la línea roja delimitado desde -2 a 2 en el eje de los residuos, se observa aquellos que están fuera de la línea se consideran atípicos. En la gráfica 43a se observa 4 valores atípicos de los residuos, estos, representan a las muestras (25, 29, 63, 75) para capacidad de campo. En la gráfica 43b se observa 3 valores atípicos de los residuos, estos, representan a las muestras (25, 29, 59, 63) para punto de marchitez.



**Figura 43: Gráficos de dispersión**

*Nota.* a) valores estimados y residuos para capacidad de campo. b) valores estimados y residuos para punto de marchitez

Luego de este primer análisis en base a los residuos studentizados, se pudo determinar aquellos valores atípicos que generó la primera ecuación de regresión, tanto para capacidad de campo como para punto de marchitez.

#### 4.4.2.2. Análisis de observaciones influyentes

Los valores de  $h_{ii}$  que se encuentran en la diagonal de la matriz H, el DFFITS y la distancia de Cook, han determinado las muestras que han sido influyentes en las variables independientes y dependientes. En la Tabla 12 están las muestras (4, 5, 25, 29, 63, 75) para capacidad de campo y de la Tabla 13 las muestras (4, 5, 25, 29, 46, 59, 63, 74) para punto de marchitez. La determinación de las observaciones influyentes se hizo por medio de un valor crítico para cada estadístico. A continuación, se presenta los valores de tales valores críticos.

$$h_{ii} > 0.1095$$

$$|DFFITS| > 0.468$$

$$D. Cook > 1$$

Estos valores críticos para cada estadístico fueron determinados mediante las ecuaciones 7, 8 y 9 estos van a ser los mismos para capacidad de campo y para punto de marchitez. Las muestras que tengan valores mayores al crítico para estadístico, se considera influyente y es necesario su análisis en la ecuación de regresión para determinar si es que esa muestra es eliminada de la data. A continuación, en la Tabla 12 se presentan el conjunto de los residuos studentizados y los valores influyentes para capacidad de campo.

**Tabla 12: Residuos y estadísticos para la determinación de puntos atípicos e influyentes para capacidad de campo**

N° Muestra	Residuos	Residuos studentizados	$h_{ii}$	D. Cook	DfFits
4	-2.2111	-1.310	0.1151	0.055	-0.472
5	-0.0311	-0.018	0.1151	0.000	-0.007
25	4.3690	2.564	0.0347	0.055	0.486
29	-4.1888	-2.471	0.0515	0.077	-0.576
63	6.0185	3.708	0.0407	0.123	0.764
75	5.6297	3.429	0.0424	0.113	0.721

A continuación, en la Tabla 13 se presentan el conjunto de los residuos studentizados y los valores influyentes para Punto de marchitez.

**Tabla 13: Residuos y estadísticos para la determinación de puntos atípicos e influyentes para punto de marchitez**

Nº Muestra	Residuos	Residuos studentizados	$h_{ii}$	D. Cook	DfFits
4	-1.126	-0.764	0.1151	0.019	-0.276
5	0.124	0.084	0.1151	0.000	0.030
25	3.798	2.574	0.0347	0.055	0.488
29	-4.196	-2.902	0.0515	0.103	-0.676
46	-3.034	-2.028	0.0407	0.042	-0.418
59	-3.424	-2.329	0.0577	0.078	-0.576
63	3.656	2.478	0.0407	0.061	0.510
74	2.822	1.951	0.1090	0.112	0.682

Las muestras presentes en las tablas 12 y 13 fueron evaluadas por separado para determinar si su presencia podría afectar la estimación de los modelos estadísticos. Luego de los análisis de residuos y de la identificación de las observaciones influyentes, se depuraron cuatro muestras (25, 29, 63, 75) para capacidad de campo y cinco muestras (25, 29, 46, 59, 63) para punto de marchitez. Estas muestras, pertenecen a la junta de usuarios del algodón, vivero forestal y jardines, provienen de campos agrícolas con poca dotación de agua y en algunos casos no se realiza trabajo constante. Además, presentan una textura franca arcillosa y muy arenosa, su depuración se dá, ya que los datos son atípicos e influyentes en la estimación de los coeficientes de regresión y verse un aumento del coeficiente de determinación luego de esta depuración de muestras. Estas muestras fueron eliminadas de toda la data quedando un total de 69 muestras para capacidad de campo y 68 muestras para punto de marchitez, con ello se procedió a determinar un segundo modelo conocido como función de edafotransferencia (FET's), para cada uno de los parámetros hídricos.

#### 4.4.3. Formulación de las funciones de edafotransferencia (FET)

Se estimó un modelo de FET para cada parámetro hídrico, por medio de la regresión lineal múltiple. En la Tabla 14 se presenta las funciones de edafotransferencia para capacidad de campo y punto de marchitez, cada una de ellas con sus respectivos coeficientes de determinación.

Para la humedad a capacidad de campo, el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) tiene un valor de 0.8479, lo que indica que el modelo es explicado en un 84.79% por el conjunto de variables independientes. Para la humedad a punto de marchitez, el  $R^2$  tiene un valor de 0.7639, lo que indica que el modelo es explicado en un 76.39% por el conjunto de variables independientes.

**Tabla 14: Funciones de edafotransferencia (FET's) y sus coeficientes de determinación ( $R^2$ ) para estimar el contenido de humedad retenido a capacidad de campo y punto de marchitez**

Humedad	Funciones de edafotransferencia (FET's)	$R^2$
Capacidad de campo	$\%W_{cc} = 0.437x\%Ar + 0.287x\%L - 0.027x\%A + 2.009$	84.79%
Punto de marchitez	$\%W_{pm} = 0.317x\%Ar + 0.158x\%L - 0.040x\%A + 2.205$	76.39%

En el segundo modelo de función de edafotransferencia se observa que el coeficiente de determinación aumentó de 76.23% a 84.79% para capacidad de campo y de 66.45% a 76.39% para punto de marchitez, esto luego de la eliminación de los valores atípicos e influyentes, que no permitían un buen ajuste en el modelo y en la estimación de los coeficientes de regresión.

En la ecuación para capacidad de campo y punto de marchitez, el valor del coeficiente de la variable arcilla es mayor que el del limo y la arena. Sin embargo, el análisis textural indica que la arena esta con mayor presencia en casi todas las muestras, además del análisis de correlación que indica una mayor asociación con la humedad, pero de manera inversa; aun así, un contenido de arcillas presente en todas las muestras parece tener mayor influencia en la predicción del modelo y en la cantidad de humedad, ya que los coeficientes que acompañan a dichas variables son mayores en comparación con la arena.

Estas funciones de edafotransferencia halladas fueron determinadas para suelos con una profundidad de 0 a 0.3 m de capa arable, en esta capa el suelo puede modificar su estructura de manera regular a través del manejo del hombre y así puede ir variando la humedad a capacidad de campo, por el contrario, la humedad a punto de marchitez no se ve afectado, ya que para ese estado influye más la textura.

Los coeficientes de las variables independientes son bien pequeños y cercanos a cero, esto se debe a que hay una fuerte correlación entre ellos, dicho esto, se estaría violando el supuesto de multicolinealidad, sin embargo, esto no influye en la predicción del modelo. Además, los coeficientes se encuentran dentro del 95% del nivel de confianza y una significación del 5%.

Se estimaron las FET's que mejor relacionen la textura con los parámetros hídricos, esto luego del análisis de residuos y de la identificación de valores influyentes, así entonces estas ecuaciones de regresión lineal múltiple halladas son las que mejor relacionan dichos parámetros.

Si bien es cierto que las ecuaciones de regresión halladas son las que mejor relacionan los parámetros hídricos con las partículas primarias, habría que determinar cuan bien ajusta el modelo a los datos obtenidos por medio de la olla de presión de Richards. Para determinar ese ajuste, se utilizó los estadísticos de evaluación con los que se va a obtener el ajuste y el grado de dispersión de las ecuaciones de regresión y con ello validar las funciones de edafotransferencia para capacidad de campo y punto de marchitez.

#### 4.4.4. Validación de los FET's

En la Tabla 15 se observa la validación de las funciones de edafotransferencia (FET's) mediante los estadísticos de evaluación para cada parámetro hídrico.

**Tabla 15: Validación de las funciones de edafotransferencia (FET's)**

<b>Función de Edafotransferencia</b>	<b>Nash-Sutcliffe (NSE)</b>	<b>ECM</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
Capacidad de Campo	0.85	1.69	84.79 %
Punto de Marchitez	0.76	1.49	76.39 %

El valor del Nash-Sutcliffe NSE para capacidad de campo y punto de marchitez es 0.85 y 0.76 respectivamente, que según la Tabla 7 presentan un ajuste de muy bueno a excelente.

EL ECM es de 1.69 para capacidad de campo y 1.49 para punto de marchitez, indicando que los valores de retención de humedad no se están sobreestimando ni subestimando en sus



valores reales, habiendo una similitud entre los valores medidos en el laboratorio por la olla de Richards y valores estimados por los modelos matemáticos.

El  $R^2$  que para capacidad de campo representa que el modelo es explicado en un 84.79% y para punto de marchitez el modelo explica un 76.39% de la variabilidad total.

Las funciones de edafotransferencias (FET's) obtenidas en el presente trabajo de investigación presentan coeficientes de determinación de 84.79% y 76.39% para las humedades gravimétricas de capacidad de campo y punto de marchitez (%Wcc y %Wpm) respectivamente mostrados en la Tabla 14 presentan valores similares a las FET's obtenidos por otros autores presentados en las tablas 4 y 5 (Pineda y Viloría, 2011).

Las FET's del presente trabajo presentan un error cuadrático medio (ECM), menor en comparación a los ECM obtenidos por otros autores presentadas en la Tabla 6 (Pineda y Viloría, 2011). Sin embargo, las ecuaciones obtenidas en la presente investigación están basadas en las partículas primarias del suelo y no teniendo en cuenta las demás propiedades físicas usadas por los otros autores, aun así, permiten obtener una buena estimación de la humedad a capacidad de campo y punto de marchitez, en comparación con las ecuaciones obtenidos por otros autores referidos (Pineda y Viloría, 2011).

Estos estadísticos demostraron que las FET's halladas por medio de la regresión lineal múltiple tiene un ajuste muy bueno, ya que la variabilidad de cada variable dependiente es explicada por las variables independientes, esto corrobora que la textura basado en la granulometría influye en la determinación de humedad con un alto coeficiente de determinación.

## V. CONCLUSIONES

- Se determinaron las funciones de edafotransferencias (FET's) para humedad a capacidad de campo y punto de marchitez en base a las partículas primarias del suelo compuesto por valores promedios de 50% de arena, 25% de arcilla y 25% de limo en la mayoría de las muestras de suelos utilizados, que permitirá conocer la humedad de los suelos de la UNALM de una manera rápida y confiable.
- El análisis de correlación lineal realizado, entre los parámetros hídricos obtenidos con la olla de presión de Richards, y cada una de las partículas primarias del suelo, indicó una buena asociación, siendo la correlación de la humedad a capacidad de campo % Hcc con el porcentaje de arena, limo y arcilla de 0.855, 0.747 y 0.803 respectivamente. y la correlación de la humedad a punto de marchitez % Hpm con el porcentaje de arena, limo y arcilla de 0.796, 0.668, y 0.780 respectivamente. Por consiguiente, existe una buena relación lineal entre parámetros hídricos y las partículas primarias del suelo.
- El método estadístico de la regresión lineal múltiple, determinó las funciones de edafotransferencia que mejor estimaron los parámetros hídricos, siendo para la humedad a capacidad de campo:  $\%W_{cc} = 0.437 * \%Ar + 0.287 * \%L - 0.027 * \%A + 2.009$  y para el punto de marchitez  $\%W_{pm} = 0.317 * \%Ar + 0.158 * \%L - 0.040 * \%A + 2.205$ , con altos coeficientes de determinación.
- En la validación, se demostró mediante los estadísticos de evaluación, que las FET's halladas ofrecen un buen ajuste, con valores de NSE mayores a 0.8 y un R<sup>2</sup> de 84.79 % para capacidad de campo y 76.39 % para punto de marchitez. Además, el error cuadrático medio resultó muy pequeño, estas validaciones para ambos modelos están dentro de los límites de confiabilidad de las FET's.

## VI. RECOMENDACIONES

Para depurar alguna muestra de suelo en la formulación de las FET's, estas deben analizarse independientemente, viendo el efecto que producen cada una de ellas en los coeficientes de regresión y el coeficiente de determinación, ya que pueden estar afectando la predicción y el ajuste de las FET's. Así, las muestras de suelo que ayuden a aumentar el valor del  $R^2$  y la estimación de los coeficientes de regresión, permanecen caso contrario deberán ser eliminados de toda la data.

De considerar otros parámetros físicos como la materia orgánica, densidad aparente y otros. Probablemente el contenido de humedad de los parámetros hídricos aumente o disminuya según sea el caso. Esto se comprobaría con la inclusión de tales parámetros físicos en las ecuaciones de regresión lineal múltiple, verificando la significancia de cada una de ellas y un análisis de correlación simple para determinar el grado de asociación con los parámetros hídricos.

Las funciones de edafotransferencia halladas en este estudio resultan de gran utilidad para futuras investigaciones, y otros trabajos en la que se requiera el cálculo de la humedad del suelo, ya que es una alternativa más económica al estimarla por medio de ecuaciones de regresión lineal múltiple, a partir de características físicas del suelo. Además, se puede utilizar en lugares donde la información hídrica es muy escasa, sin embargo, es necesario analizar estas FET's, si se quiere utilizar en una zona ajena al área donde ha sido desarrollado, ya que las condiciones climáticas y edafológicas pueden afectar la precisión y estimación de los parámetros hídricos. Esto influye en la aplicación de estas FET's, para tipos de suelo que presenten un porcentaje de arena cercano al 50% y 25% para arcilla en una muestra de suelo, ya que las FET's, han sido desarrolladas bajo un tipo de suelo específico en la UNALM.

## VII. BIBLIOGRAFÍA

Agudo, L. (2014). *Manual de Edafología*. Recuperado de [https://www.academia.edu/15979558/MANUAL\\_DE\\_EDAFOLOGIA](https://www.academia.edu/15979558/MANUAL_DE_EDAFOLOGIA).

Andina, M. (15 ago. 2018). Introducción a Estadística con R. <https://bookdown.org/matiasandina/R-intro/>

Ciancaglini, N. (2019). Guía para la determinación de textura de suelos por método organoléptico [Archivo PDF]. Recuperado de [http://www.prosap.gov.ar/Docs/INSTRUCTIVO \(R-001\) Guía para la determinación de textura de suelos por método organoléptico.pdf](http://www.prosap.gov.ar/Docs/INSTRUCTIVO%20(R-001)%20Guía%20para%20la%20determinación%20de%20textura%20de%20suelos%20por%20método%20organoléptico.pdf).

Conti, M. (coord.). (2000). Principios de Edafología: con énfasis en suelos argentinos (2° ed.). Buenos Aires, Argentina: Facultad de Agronomía. 430 p. Recuperado de [http://files.bgf-info9.webnode.com/200000212-c98f3ca895/PrincipiosEdafología M Conti.pdf](http://files.bgf-info9.webnode.com/200000212-c98f3ca895/PrincipiosEdafología%20M%20Conti.pdf).

De la Fuente, S. (2011). Regresión Múltiple. Madrid, Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales, UAM.

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Italia). (2020). Propiedades Físicas del Suelo. Recuperado de <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/>.

Fuentes, J. (2003). *Técnicas de riego*. (4° ed.). Madrid, España: Mundi Prensa. 471 p.

- García, J., Sosa, F., Fernández, J. (2012). *El Agua del Suelo*. Cátedra de Edafología, Facultad de Agronomía y Zootecnia, Universidad Nacional de Tucumán. Recuperado de <http://www.edafologia.com.ar>.
- Gómez, V. (8 jun. 2019). Suelos arenosos: características, propiedades, composición [Mensaje en un blog]. Recuperado de <https://www.lifeder.com/suelos-arenosos/>.
- Shaw, H. (31 oct. 2014). Unidad IV: Fase líquida del suelo. <https://www.slideserve.com/herrod-shaw/unidad-iv-fase-l-quida-del-suelo>
- Hernández, F., Mazo, M. (30 oct. 2020). Modelos de Regresión con R. [https://fhernanb.github.io/libro\\_regresion/](https://fhernanb.github.io/libro_regresion/)
- Ibáñez, J. (5 jul. 2006). El Agua en el Suelo 4: Textura del suelo y propiedades hídricas [Mensaje en un blog]. Madrid, España. Recuperado de <https://www.madrimasd.org/blogs/universo/2006/07/05/33887>.
- Jaramillo, D. (2002). *Introducción a la ciencia del suelo*. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia. 613 p.
- Martínez, J., Ceballos, A. (2001). *Estimación de propiedades hídricas de los suelos mediante el uso de funciones de edafo-transferencia*. Barcelona: Instituto de Ciencias de la Tierra “Jaume Almera”, Temas de investigación en la zona no saturada del suelo 5.
- Mendoza, A.E. (2013). *Riego por goteo*. El Salvador: CENTA. 98 p. Recuperado de <http://www.centa.gob.sv/docs/guias/riego/Riego por goteo.pdf>
- Pineda, C; Vilorio, J. 1997. Funciones de pedotransferencia para estimar la retención de humedad en suelos de la cuenca del lago de valencia. Maracay, Venezuela.

- Quiroga, A; Fernández, R; Álvarez, C. (2018). *Análisis y evaluación de propiedades físico hídrica de los suelos*. La Pampa, Argentina: INTA. 123 p.
- Rucks, L., Gracia, F., Kaplán, A., Ponce, J., Hill, M. (2004). *Propiedades Físicas del Suelo*. Montevideo, Uruguay. Recuperado de <http://bibliofagro.pbworks.com/f/propiedades+fisicas+del+suelo.pdf>.
- Valverde, J. (1998). *Riego y Drenaje*. San José, Costa Rica: EUNED. 244 p.
- Vásquez, A., Vásquez, I., Vásquez, C., Cañamero, M. (2017). *Fundamentos de ingeniería de riegos*. Lima, Perú: Universidad Nacional Agraria La Molina. 442 p.
- Villalobos, F., Mateos, L., Orgaz, F., Fereres, E. (2009). *Fitotecnia: bases y tecnologías de la producción agrícola* (2° ed.). Madrid, España: Mundi Prensa. 497 p.
- Yáñez, N., Dec, D., Clunes, J., Dörner, J. (2015). Estimación de la curva de retención de agua de un Andisol bajo un cultivo de arándano, a través de funciones de pedotransferencia. *Agro Sur* 43(3): 63-72.

## VIII. ANEXOS

### Anexo 1: Panel fotográfico



**Figura 44: Calicata con diferentes horizontes de suelo**



**Figura 45: Identificación de la capa de suelo a muestrear**



**Figura 46: Muestras de suelo saturadas para capacidad de campo**



**Figura 47: Muestras de suelo en el decantador**





**Figura 48: Muestras de suelo listas para ser llevadas al horno**



**Figura 49: Muestras de suelo para capacidad de campo en el horno**



**Figura 50: Presentación de las muestras de suelo para punto de marchitez**



**Figura 51: Muestras de suelo saturadas para punto de marchitez**



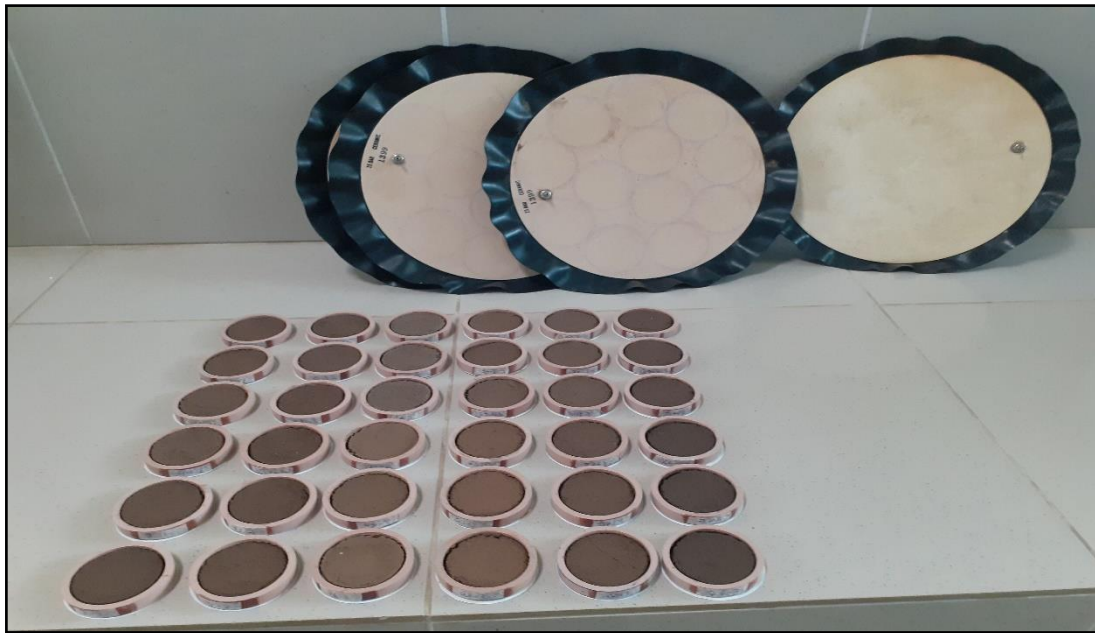
**Figura 52: Presentación de las muestras de suelo y la Olla de Richards**



**Figura 53: Anillos de plástico con muestras de suelo en el horno**



**Figura 54: Laboratorio de riego y drenaje**



**Figura 55: Platos de cerámica y muestras de suelo**



**Figura 56: Muestras de suelo para punto de marchitez**



**Figura 57: Muestras de suelo para capacidad de campo**



**Figura 58: Olla de baja presión y Cámara de alta presión**



**Figura 59: Salida de agua de la Olla de Richards (Cámara de alta presión)**