

**UN MODELO DE PREDICCIÓN DEL LÍMITE SUPERIOR  
DE LABORABILIDAD DE SUELOS EN TÉRMINOS DE SU  
TEXTURA Y CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA**

**MARIO SANTOS RÍOS CAMEY**

**T E S I S**

Presentada como Requisito Parcial para  
Obtener el Grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS  
EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN**



Universidad Autónoma Agraria  
Antonio Narro

PROGRAMA DE GRADUADOS

Buenvista, Saltillo, Coahuila, México  
Noviembre de 2007

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA  
ANTONIO NARRO**

**SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO**

**UN MODELO DE PREDICCIÓN DEL LÍMITE SUPERIOR DE  
LABORABILIDAD DE SUELOS EN TÉRMINOS DE SU TEXTURA Y  
CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA**

TESIS

Por

MARIO SANTOS RÍOS CAMEY

Elaborada bajo la supervisión del comité particular de asesoría y aprobada  
como requisito parcial, para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS  
EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN**

COMITÉ PARTICULAR

Asesor principal: \_\_\_\_\_  
Dr. Martín Cadena Zapata

Asesor: \_\_\_\_\_  
Dr. Mario Cantú Sifuentes

Asesor: \_\_\_\_\_  
Dr. Alejandro Zermeño González

Asesor: \_\_\_\_\_  
Dr. Raúl Rodríguez García

\_\_\_\_\_  
**Dr. Jerónimo Landeros Flores**

**Subdirector de Postgrado**

Buenvista, Saltillo, Coahuila, Noviembre de 2007

## AGRADECIMIENTOS

A **Dios** nuestro Señor sobre todas las cosas. Gracias Padre por tu amor y misericordia. Por haberme dado el don maravilloso de la vida, por guiarme siempre por el buen camino y porque nunca me has soltado de tu mano.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)** por el apoyo económico que me brindó para la realización de mis estudios.

A mi **ALMA TERRA MATER** quien nuevamente me cobijo en su seno y me formó para ser hombre de bien y por ser una Universidad tan generosa.

Al **Dr. Martín Cadena Zapata** por ser quien me integró a este proyecto y por su gran experiencia se llevó a la culminación exitosa de este trabajo de investigación, Muchas gracias.

Al **Dr. Mario Cantú Sifuentes** por su apoyo, por sus conocimientos transmitidos, por su valiosa ayuda en lo que respecta a la parte estadística de este trabajo y por su amistad, muchas gracias y Dios lo bendiga.

Al **Dr. Alejandro Zermeño González** y **Dr. Raúl Rodríguez García** por participar en este proyecto y por sus sugerencias hechas para la elaboración del mismo.

Al **Dr. Rubén López Cervantes**, gracias por el apoyo recibido durante mi estancia en la universidad, por sus buenas sugerencias a este trabajo de investigación, sobre todo en lo que concierne al área de suelo.

Quiero expresar mi sincero agradecimiento a la **T.L.Q. Patricia Herrera Gaytán** del Departamento de Suelos, por su colaboración, tiempo dedicado y valiosa ayuda en esta tesis; sobre todo por su amistad, que Dios me la bendiga Paty.

A todos los catedráticos de la Maestría en ISP que me compartieron sus conocimientos; asimismo a los maestros del Departamento de Maquinaria Agrícola que me apoyaron durante mi estancia en la Universidad.

A todos mis compañeros de generación de la maestría y doctorado en Ingeniería de Sistemas de Producción: **Rut Vanesa Dávila Salinas, Heidi Melania Medina Montenegro, Amalia Margarita González Cadenas, Luis Fernando Barbosa Abundis y M.C. Armando López Santos**, gracias por haberme dado su amistad. Dios los bendiga a dondequiera que vayan.

A mis amigos Mauricio, René, Reynolds, Alexander Gil, Patricia Acuña, Mario Moreno, Jorge, Marcelino, Ezequiel Gallegos, Alejandro Montes y Ricardo, gracias por su amistad.

## **DEDICATORIA**

### **A mis Padres:**

Sr. Antonio Ríos Granados  
Sra. Floribertha Camey López

Porque gracias a la educación, sus sabios consejos, por su cariño y por su paciencia, he logrado lo que ahora soy.

### **A mis queridos hermanos:**

Bianey, Erbin, Octavio, Yesenia, Juan y Yuyi.

Por su apoyo y por su cariño.

### **A mis tíos, primos, sobrinos, abuelos, amigos y cuñados:**

Por sus consejos, motivación y sus buenos deseos hacia mi persona.

## **COMPENDIO**

**Un modelo de predicción del límite superior de laborabilidad de suelos en términos de su textura y contenido de materia orgánica**

**Por:**

**MARIO SANTOS RÍOS CAMEY**

**MAESTRÍA EN CIENCIAS EN  
INGENIERÍA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
Buenavista, Saltillo, Coahuila, México, Noviembre de 2007**

**Dr. Martín Cadena Zapata - Asesor-**

**Palabras clave:** Humedad al LSL, Compactación, Labranza, Modelación estadística

Para la operación de la maquinaria agrícola, en México, no se tiene una forma cuantitativa de determinar el estado de humedad máximo que se le permite al suelo para ser laborado antes de que ocurra compactación por tráfico de maquinaria agrícola, es decir, no se cuantifica el límite superior de laborabilidad de los suelos.

El objetivo de esta investigación fue determinar, en laboratorio, un modelo estadístico que describa el límite superior de laborabilidad (LSL), medido en

términos de la humedad gravimétrica, como una función del porcentaje de materia orgánica y la textura del suelo. Para tal efecto se aplicó el método de la permeabilidad al aire a 19 suelos representativos del país, contrastantes en cuanto a textura y contenido de materia orgánica.

Este modelo será una herramienta que permitirá tomar decisiones adecuadas al efectuar las labores de preparación del suelo, antes de que éste llegue al punto de compactación. Además si se conoce el LSL de los suelos se contribuirá a evitar gasto excesivo de energía en las labores.

Los suelos seleccionados fueron propuestos a diferentes contenidos de humedad desde consistencia seca hasta plástica. Las muestras fueron compactadas mediante una prensa neumática, simuladora de compactación. Posteriormente la permeabilidad al aire se midió por medio de un permeámetro donde la muestra de suelo es sometida a un gradiente de presión.

Se usó el paquete estadístico R para obtener un modelo de regresión múltiple, resultando que los porcentajes de arcilla, limo y materia orgánica fueron las variables que mejor predijeron al LSL, del análisis de regresión múltiple se obtuvo una  $R^2=0.996$  lo cual nos indica que las variables regresoras explican la variabilidad total del modelo en un 99%.

De las variables independientes, se distinguió la Materia Orgánica como la que mayor efecto (impacto) presentó en la respuesta (LSL). Por otra parte, la arcilla impactó en la respuesta casi el doble que el limo.

De los supuestos de la parte aleatoria del modelo se tuvo evidencia de que la varianza en los residuales es constante, no se tuvo problemas de normalidad ni de correlación serial en los errores.

Los resultados de la validación del modelo indicaron que el modelo ajustado es estable puesto que el error de predicción resultó en 3.6, esto redundo en realizar predicciones con bastante precisión.

## **ABSTRACT**

**A prediction model of wet soil workability limit by using texture and organic matter content**

**By:**

**MARIO SANTOS RÍOS CAMEY**

**MASTER IN SCIENCES  
IN ENGINEERING OF PRODUCTION SISTEMES**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
Buenavista, Saltillo, Coahuila, México, November of 2007**

**Dr. Martín Cadena Zapata - Advisor-**

**Key words:** Humidity at WWL, Compaction, Tillage, Statistical Modeling

In Mexico there is not a quantitative way to determine the maximum moisture content of the soil, which still allows workability by agricultural traffic before compaction occurs. This implies that the wet soil workability limit is not quantified.

The objective of this research was to determine, under laboratorial conditions, a statistical model that relates the wet soil workability limit (WWL), measured in terms of gravimetric humidity as a function of the percentage of organic matter and soil texture. In order to achieve this, the air permeability method was applied

to 19 representative soil samples that occur in Mexico, which contrasted in texture and organic matter content.

The model can function as a tool that will help to make improved decisions on the soil workability limit before compaction takes place. Furthermore, the WWL of the soil can help to make decisions in order to avoid wasting energy during operation.

The selected soils were subjected to different moisture contents between dry and plastic soil consistency. The samples were compacted by a pneumatic press with a compaction simulator. Subsequently, the air permeability was measured by using a permeameter in which the soil samples were subjected to a pressure gradient.

The R statistical package was used to obtain a multiple regression model. The results showed that the percentage of clay, silt and organic matter were the variables that predicted the WWL in a most accurate way. This was obtained with an  $R^2$  of 0.996. This value shows that the independent variables account for the total variability of the model by 99%.

The Organic Matter content was the variable which showed to have the greatest effect on the WWL, compared to the other variables. The effect of clay, on the WWL, was almost the double of the silt.

When analyzing the random part of the model, there was evidence that the variance in the residuals is constant. There were not problems with the normality or serial correlation in the errors.

The results of the model validation indicated that the fitted model is stable, since the prediction error resulted in 3.6. This showed the possibility of making predictions of the WWL with great precision.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

|  |     |
|--|-----|
| <b>COMPENDIO</b> .....   | vi  |
| <b>ABSTRACT</b> .....  | ix  |
| <b>ÍNDICE DE CONTENIDO</b> .....   | xii |
| <b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....   | xiv |
| <b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....  | xv  |
| <b>INTRODUCCIÓN</b> .....  | 1   |
| <b>Límites de Laborabilidad</b> .....                                      | 1   |
| <b>Límite superior de laborabilidad</b> .....                              | 3   |
| Cuantificación del LSL en laboratorio .....                                | 5   |
| <b>Objetivos</b> .....   | 7   |
| <b>Hipótesis</b> .....   | 7   |
| <b>REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....  | 8   |
| <b>Modelos de Regresión</b> .....  | 8   |
| Problemas en el Ajuste de un Modelo de Regresión Lineal Múltiple .....     | 9   |
| <b>Modelación de Algunas Propiedades del Suelo</b> .....                   | 10  |
| Funciones de Edafotransferencia .....                                      | 11  |
| <b>Importancia de la Humedad en la Laborabilidad del Suelo</b> .....       | 12  |
| Estados de Consistencia del Suelo .....                                    | 14  |
| <b>Compactación del Suelo</b> .....  | 17  |
| Efecto del Tráfico de Maquinaria Agrícola sobre la Porosidad del Suelo ... | 19  |
| <b>Labranza, Estabilidad de Agregados y Agregación del Suelo</b> .....     | 22  |
| <b>Métodos para Estimar la Permeabilidad al Aire del Suelo</b> .....       | 23  |
| Método Indirecto .....   | 23  |
| Métodos de Laboratorio .....   | 24  |
| <i>Distribución del tamaño del grano</i> .....                             | 24  |
| <i>Prueba de la columna</i> .....  | 24  |
| Método de Campo .....  | 25  |
| <i>Prueba de la bomba neumática</i> .....                                  | 25  |

|   |    |
|---|----|
| <b>MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....   | 26 |
| <b>Localización Geográfica</b> .....                                      | 26 |
| <b>Características de los Suelos Analizados</b> .....                     | 27 |
| <b>Preparación y Procesamiento de las Muestras</b> .....                  | 29 |
| <b>Contenido de Humedad de las Muestras</b> .....                         | 32 |
| <b>Prueba de Compactación</b> .....                                       | 33 |
| <b>Prueba de Permeabilidad al Aire</b> .....                              | 34 |
| <b>Determinación de la Textura de los Suelos</b> .....                    | 36 |
| <b>Contenido de Materia Orgánica</b> .....                                | 38 |
| <b>Análisis Estadístico</b> .....   | 39 |
| El modelo lineal .....  | 39 |
| Verificación de los supuestos del modelo .....                            | 41 |
| <i>Parte estructural</i> .....  | 41 |
| <i>Parte aleatoria</i> .....  | 42 |
| Validación del modelo .....   | 43 |
| <b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....                                       | 45 |
| <b>Resultados del Ajuste y Análisis de Varianza de la Regresión</b> ..... | 45 |
| <b>Supuestos del Modelo de Regresión</b> .....                            | 47 |
| Prueba de normalidad en los errores .....                                 | 47 |
| Prueba de correlación serial .....  | 48 |
| Prueba para varianza constante u Homocedasticidad .....                   | 48 |
| <b>Resultados de la Validación del Modelo</b> .....                       | 50 |
| <b>CONCLUSIONES</b> .....   | 52 |
| <b>LITERATURA CITADA</b> .....  | 54 |
| <b>APÉNDICE A</b> .....   | 59 |
| <b>APÉNDICE B</b> .....   | 60 |
| <b>APÉNDICE C</b> .....   | 65 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 1.1</b> Diferencia entre estado friable y rango laborable, según los estudios de Cadena, <i>et al</i> (2002) y Hoogmoed, <i>et al</i> (2003). ..... | 3  |
| <b>Figura 2.1</b> Estados de consistencia del suelo. Curvas de adhesión suelo-metal y cohesión molecular de los agregados. ....                               | 15 |
| <b>Figura 3.1</b> Estados del país que se les colectó suelo .....   | 27 |
| <b>Figura 3.2</b> Tamices de 2.4 y 4.0 mm.....  | 29 |
| <b>Figura 3.3</b> Suelos tamizados.....   | 30 |
| <b>Figura 3.4</b> Suelos asperjados desde seco hasta plástico. ....   | 31 |
| <b>Figura 3.5</b> Balanza de precisión.....   | 31 |
| <b>Figura 3.6</b> Aspersor.....   | 31 |
| <b>Figura 3.7</b> Prensa neumática simuladora de compactación.....  | 33 |
| <b>Figura 3.8</b> Permeámetro y descripción de sus partes .....   | 34 |
| <b>Figura 3.9</b> Micrómetro para medir la longitud de compactación de la muestra. ....   | 35 |
| <b>Figura. 3.10</b> Uso de sifón para obtener las arcillas a 20 cm de profundidad....   | 37 |
| <b>Figura 4.1</b> Inspección Gráfica para detectar varianza constante .....   | 49 |
| <b>Figura B1</b> Limite superior de laborabilidad de la localidad Tamaulipas .....  | 64 |
| <b>Figura C1</b> Prueba de Homocedasticidad .....   | 69 |
| <b>Figura C2</b> Transformación de Box-Cox.....   | 72 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabla 4.1</b> Suelos analizados .....                                     | 28 |
| <b>Tabla 4.2</b> Resumen del ajuste .....                                    | 46 |
| <b>Tabla 4.3</b> Análisis de varianza de la regresión .....                  | 46 |
| <b>Tabla A1</b> Viscosidad dinámica del aire a diferentes temperaturas ..... | 59 |
| <b>Tabla B1</b> Resumen del ajuste cuadrático .....                          | 62 |
| <b>Tabla B2</b> Resumen del nuevo ajuste.....                                | 63 |

# INTRODUCCIÓN

## Límites de Laborabilidad

El estado de humedad del suelo al momento de realizarle labranza es uno de los parámetros cualitativos más importantes (Tobias y Tietje, 2007) debido a que esta propiedad física define su estado de consistencia (Ashburner y Sims, 1984). En particular, es importante cuantificar la humedad en el rango de laborabilidad con el fin de lograr la mejor calidad de laboreo y ahorro de energía además de evitar daño a la estructura (compactación) y reducir la erosión (Pineda *et al*, 1996).

La laborabilidad, como un concepto de labranza, es una cualidad del suelo que describe como fácilmente éste puede ser labrado o cultivado; asimismo indica la condición de cuando las operaciones de labranza pueden ser ejecutadas para la preparación de la estructura y forma deseada de la superficie (FAO, 1983; Goense, 1987).

Klenin *et al* (1986), encontraron que el suelo presenta condiciones laborables cuando su contenido de humedad gravimétrica se encuentra entre 40% y 60% de la humedad a capacidad de campo. Por otro lado Braunack y Mcphee

(1991), encontraron que en un suelo arcilloso la mejor cama de siembra se obtuvo cuando la humedad gravimétrica fue del 86% del valor de contenido de humedad observado en límite inferior de plasticidad (LIP).

El rango laborable del suelo está usualmente ligado a su consistencia, a partir del estado friable al cual lo definen los límites de contracción (LC) e inferior de plasticidad (LIP). La friabilidad es la facilidad que tiene el suelo de desmenuzarse. El estado de humedad en que los suelos son friables es el de mejores condiciones para la labranza, ya que son estos suelos los que poseen un mejor estado de agregación para el cultivo (Baver *et al*, 1980). Sin embargo, se han realizado estudios, Cadena *et al* (2002) y Hoogmoed, *et al* (2003), en los que se encontró que el rango laborable real fue menor que el estado friable teórico de los suelos estudiados.

La diferencia entre el estado friable y el rango laborable de acuerdo a dichos estudios lo muestra la Figura 1.1, donde se ve claramente que laborar en el límite inferior de plasticidad implica un riesgo de daño a la estructura del suelo por compactación.

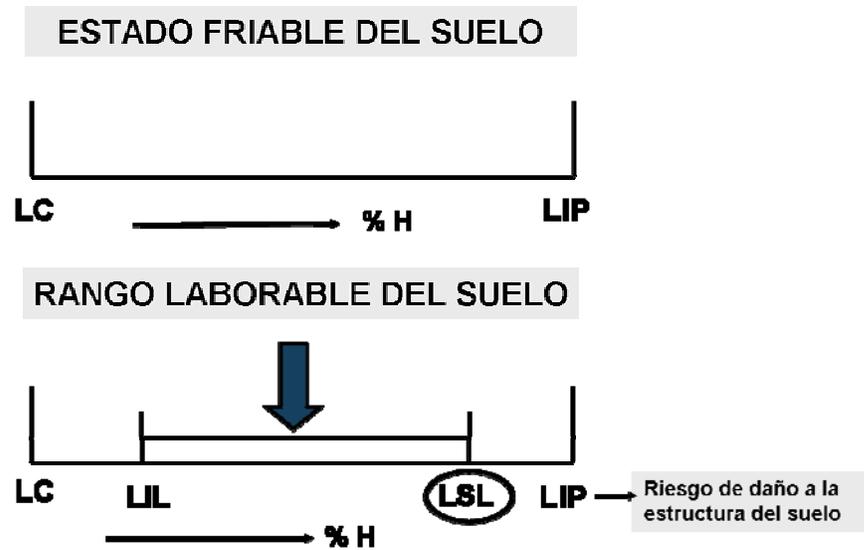


Figura 1.1 Diferencia entre estado friable y rango laborable, según los estudios de Cadena, *et al* (2002) y Hoogmoed, *et al* (2003).

### Límite superior de laborabilidad

Si las condiciones iniciales del suelo, como el contenido de humedad y la densidad, son conocidas y el objetivo de la labranza es para aflojar un suelo compactado, se puede decir que el proceso de aflojamiento se produce cuando las unidades estructurales más grandes se dividen en unidades más pequeñas. Así pues, existe en general una disminución en la densidad del suelo y se supone que las condiciones físicas son alcanzadas con la operación de labranza (Hoogmoed *et al*, 2000).

Por el contrario, si por efecto de la labranza se da un incremento de la densidad del suelo, entonces pequeñas unidades estructurales se colapsan dentro de

unidades más grandes, esto ocasiona una gran reducción en el tamaño de los poros (Staffordm 1982; Slowinska-Jurkiewicz, 1994); este cambio provoca una caída drástica de permeabilidad al aire (Perdok y Hendrikse, 1982) y por lo tanto se produce una falla en el flujo (aire) debido a la desaparición de poros grandes, cuando esto ocurre el proceso ha cambiado a compactación. Esta situación es más probable que ocurra en un contenido alto de humedad y el límite superior de laborabilidad (LSL) es encontrado abajo de ese valor de humedad.

La compactación se ha convertido en un problema serio para la agricultura mecanizada debido, principalmente, al tráfico de la maquinaria sobre el suelo a una condición de humedad inadecuada o subóptima, esto ocasiona un incremento de la densidad aparente y por lo tanto una disminución en la porosidad del suelo ocasionando una restricción en el crecimiento radicular de las plantas, lo que disminuye notablemente el rendimiento de los cultivos (Zhang *et al*, 2006).

Por lo antes discutido, es importante cuantificar el límite superior de laborabilidad, definido como el estado máximo de humedad en el que el suelo aún puede ser laborado sin riesgo de sufrir deterioro de la estructura por compactación.

## Cuantificación del LSL en laboratorio

La permeabilidad del suelo al aire es un método de laboratorio que estima el área de poros de una muestra de suelo, previamente compactada, que se coloca en un cilindro de aproximadamente  $100 \text{ cm}^3$ . Para realizar la prueba de permeabilidad al aire se usa un permeámetro donde la muestra de suelo es sometida a un gradiente de presión. Cuando se aplica este método, el límite superior de laborabilidad es considerado como el contenido de humedad en el que después de una presión de  $0.40 \text{ Mpa}$  la permeabilidad al aire resultante es  $1 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$ . Este método fue utilizado con éxito por Perdok y Hendrikse (1982) y por Hoogmoed *et al* (2003) para determinar el LSL del suelo en laboratorio.

El cálculo del LSL, tanto en laboratorio como en campo, para todos los suelos es un proceso caro que consume mucho tiempo y mano de obra. Saxton y Rawls (2006) mencionan que tanto en campo como en laboratorio las mediciones son costosas y difíciles de realizar y frecuentemente imprácticas para muchos análisis.

Una alternativa en la cuantificación del LSL es usar modelación estadística a partir de la creación de una base datos que contengan características de interés del suelo. Al respecto Graybill e Iyer (1994) mencionan que el descubrimiento de asociaciones y la habilidad para expresarlas en una forma matemática precisa, puede ser capaz de predecir el valor no observable de una variable basada en el valor observado de una o más variables asociadas.

Asimismo Pachepsky y Rawls (2004), establecen que buenas estimaciones en vez de mediciones directas pueden ser suficientemente exactas para muchas aplicaciones.

El término función de edafotransferencia (FET) se usa para describir ecuaciones que expresan dependencias de propiedades de suelos sobre atributos de los mismos disponibles y medidos. Un prerrequisito para desarrollar FET es la disponibilidad de una base de datos como recurso que contenga predictores potenciales (Silva *et al*, 2006). Muchas de las FET que la literatura reporta tienen como predictores a la textura de suelo y a la materia orgánica, pues son propiedades físicas que son relativamente sencillas de cuantificar y que son de medición rutinaria (Nemes *et al*, 2003; Saxton y Rawls, 2006). Además, de los atributos intrínsecos de los suelos; la textura y la materia orgánica son las responsables de la respuesta del suelo a la compactación (Imhoff *et al*, 2004).

El objetivo de esta investigación fue desarrollar un modelo que describa el límite superior de laborabilidad (LSL), medido en términos de la humedad gravimétrica, como una función del porcentaje de materia orgánica y la textura del suelo.

Este modelo será una herramienta que permitirá tomar decisiones adecuadas al efectuar las labores de preparación del suelo, antes de que éste llegue al punto de compactación. En particular, a los productores que usen maquinaria agrícola.

Asimismo si se conoce el LSL de los suelos se contribuirá a evitar gasto excesivo de energía en las labores.

## **Objetivos**

1. Obtener un banco de datos, que contenga las características de interés del suelo, en el que se incluya textura, contenido de materia orgánica y el LSL en términos de humedad gravimétrica.
2. Determinar un modelo matemático correlacionando los valores del LSL como variable de respuesta contra los porcentajes de textura y de Materia Orgánica.
3. Verificar si el modelo predice adecuadamente el límite superior de laborabilidad de los suelos.

## **Hipótesis**

1. El LSL en términos de humedad gravimétrica es una función del contenido de materia orgánica y textura del suelo.
2. Es posible determinar un modelo que prediga el LSL de los suelos correlacionando los valores de la textura y contenido de materia orgánica (variables predictoras).

# REVISIÓN DE LITERATURA

## Modelos de Regresión

Faraway (2005) establece que un análisis de regresión es útil para modelar la relación entre una variable  $Y$ , llamada variable de respuesta y una o más variables explicatorias  $X_1, X_2, \dots, X_p$ . Cuando  $p=1$ , la regresión es llamada simple, y cuando  $p > 1$ , múltiple. La respuesta debe ser una variable continua mientras que las variables explicatorias pueden ser continuas, discretas o categóricas.

El análisis de regresión tiene varios posibles objetivos, los cuales incluyen:

1. Predicción de observaciones futuras
2. Evaluación de efecto o relación entre las variables explicatorias sobre la respuesta
3. Una descripción general de la estructura de los datos

Graybill e Iyer (1994) mencionan que el análisis de regresión es un método que permite investigar la asociación entre variables siempre que datos apropiados están disponibles.

De acuerdo con Ojeda (2006), los modelos de regresión son muy populares por varias razones:

- (1) Por sus diversos usos (descripción, estimación, predicción, pronóstico y calibración);
- (2) Porque son modelos muy sencillos para interpretar;
- (3) Porque aproximan bien a relaciones funcionales complejas
- (4) Porque existe una basta teoría y facilidades computacionales para su uso en el proceso de modelación.

### **Problemas en el Ajuste de un Modelo de Regresión Lineal Múltiple**

Vilar Fernández (2006) establece que los principales problemas que se pueden presentar en la construcción de un modelo de regresión múltiple son los siguientes:

**Multicolinealidad:** las variables regresoras son muy dependientes entre sí, y es difícil separar su contribución individual al modelo. Consecuencia de esto es que los parámetros del modelo son muy inestables, con varianzas muy grandes.

**Error de especificación:** el modelo de regresión no proporciona un buen ajuste a la nube de observaciones. Esto puede ser por diferentes motivos, entre otros: la relación no es lineal; existencia de variables explicativas relevantes que no han sido incluídas en el modelo. Por esto, cuando se dispone de un conjunto amplio de posibles variables explicativas, es importante disponer de algoritmos que seleccionen el subconjunto más adecuado de variables explicativas que se deben incorporar al modelo de regresión, así como de medidas que estimen la bondad del ajuste

**Falta de Normalidad:** los residuos no son normales.

**Heterocedasticidad:** la varianza no es constante.

**Existencia de valores atípicos:** existen datos atípicos que se separan de la nube de datos muestrales que pueden influir en la estimación del modelo de regresión o que no se ajustan al modelo.

**Dependencia (autocorrelación):** existe dependencia entre los errores.

### **Modelación de Algunas Propiedades del Suelo**

La modelación y la valoración tanto medioambiental como agrícola tienen múltiples usos, particularmente en la medición de parámetros de suelo que gobiernan la retención y el transporte de agua y químicos del mismo. Estos parámetros son, generalmente, difíciles de medir y los procedimientos para hacerlo son costosos. Buenas estimaciones, en vez de mediciones directas pueden ser suficientemente exactas para muchas aplicaciones. Las funciones de edafotransferencia o, también llamadas, de pedotransferencia (FET) proveen tales estimaciones para su utilización en el panorama de información de suelo disponible para trasladar datos que tenemos hasta los datos que necesitaremos (Pachepsky y Rawls, 2004).

## **Funciones de Edafotransferencia**

El término función de edafotransferencia o de pedotransferencia (FET) es usado para describir ecuaciones que expresan dependencias de propiedades de suelos sobre atributos de los mismos disponibles y medidos. Un prerrequisito para desarrollar FET es la disponibilidad de una base de datos como recurso que contenga predictores potenciales (Silva *et al*, 2006).

Bell y Van Keulen (1995) realizaron un estudio en México de cuatro FET para predecir propiedades de suelo tales como capacidad de intercambio catiónico (CIC) y retención de humedad al punto de marchitez permanente (-1500 Kpa). La FET para CIC que usó como variables independientes al contenido de Arcilla, Materia Orgánica y pH, explicaron 96 % de la variabilidad de los suelos en estudio. Por otro lado la FET para PMP usando las mismas variables explico el 93 % de la variabilidad de los cuatro sitios estudiados. Concluyeron que las FET para este estudio fueron adecuadas puesto que se encontraron buenos ajustes.

Bonilla y Cancino (2001), evaluaron en la República de Chile cinco funciones de edafotransferencia para estimar la humedad en el suelo. De acuerdo a los resultados obtenidos señalaron que aquellas funciones basadas exclusivamente en textura, materia orgánica y densidad aparente no estimaron con un grado de precisión aceptable la retención de humedad en los suelos estudiados. La exactitud de las estimaciones se incrementó progresivamente al incluir en la regresión uno (1500 kPa) o dos (33 y 1500 kPa) valores conocidos de la curva

de retención de humedad. Concluyeron que las FET son una alternativa interesante y señalan la necesidad de seguir estudiando su comportamiento en distintas condiciones edáficas de aquel país.

Cadena *et al*, (2006) evaluaron 4 FET para estimar la curva de retención de humedad para uso en la planeación en labranza. Los resultados obtenidos indican que las funciones de Stolte *et al*, (1996) y Wosten *et al*, (1998) pueden ser utilizadas para predecir la curva de retención de humedad para los suelos francos del trópico de México.

### **Importancia de la Humedad en la Laborabilidad del Suelo**

En regiones deficitarias de precipitación con lluvias altamente estacionales, la labranza y las prácticas afines de conservación de agua son muy importantes para lograr buenas condiciones físicas del suelo y asegurar una aceptable productividad de los cultivos (Herve, 1993).

La preparación de la cama de siembra comúnmente es realizada en condiciones subóptimas de humedad, lo cual requiere al menos dos pasos de rastra para conseguir un suelo aceptable. Esto no solo conduce a un alto gasto de energía sino también deja al suelo propenso a erosión hídrica y eólica (Pineda *et al*, 1996).

El contenido de humedad óptimo de un suelo es definido como aquél en el que la cantidad de agregados producidos durante la labranza es mínimo, los suelos que tienen buenas cualidades físicas agregados no mayores a 50 mm deben

ser producidos al efectuar las operaciones de labranza (Dexter y Birkas, 2004, Keller *et al*, 2007).

Klenin *et al* (1986), mencionan que el suelo presenta condiciones laborables cuando su contenido de humedad gravimétrica se encuentra entre 40% y 60% de la humedad a capacidad de campo. Por otro lado Braunack y Mcphee (1991), encontraron que en un suelo arcilloso la mejor cama de siembra se obtuvo cuando la humedad gravimétrica fue del 86% de la humedad observada en el límite inferior de plasticidad (LIP).

Para Ashburner y Sims (1984) las propiedades dinámicas del suelo de mayor interés para los estudios de labranza y tracción son los parámetros de cohesión, adhesión y fricción. Estas propiedades determinan en su mayor parte la resistencia del suelo a las fuerzas que les aplican los implementos de labranza. Los valores e influencia de las propiedades dependen de la distribución de tamaño de las partículas del suelo (textura), cantidad y naturaleza de la arcilla, la cantidad de materia orgánica y el contenido de humedad, siendo esta última la más importante, ya que determina los diferentes estados de consistencia del suelo.

## **Estados de Consistencia del Suelo**

Los estados de consistencia del suelo (Figura 2.1) son evaluados de acuerdo a su contenido de humedad. Los límites de los estados de consistencia son:

**Límite de contracción (LC):** Entre las consistencias friable y de cementado se presenta el límite de contracción. Este punto es alcanzable cuando al reducir el contenido de humedad a un nivel más bajo que este límite se produce muy poca contracción, es decir, una vez drenado el suelo hasta el punto la reducción posterior en volumen total del mismo es mínima así las partículas del suelo (arcilla principalmente) están prácticamente tocándose unidas muy fuertemente por las películas de agua (Ashburner y Sims, 1984).

**Límites atterberg de plasticidad.** Estos límites definen los valores del porcentaje máximo y mínimo del contenido de agua en el suelo en el estado plástico. El límite inferior, es el valor de humedad en el cual el suelo deja de ser friable y pasa a una consistencia plástica. El límite superior significa que debido a un aumento de humedad la cohesión decrece tanto que la masa del suelo fluye bajo la acción de una fuerza. La plasticidad de un suelo depende principalmente de la cantidad, tamaño y tipo de arcilla que contenga, además del tipo de cationes intercambiables y el contenido de materia orgánica (Baver *et al*, 1980).

## ESTADOS DE CONSISTENCIA DEL SUELO

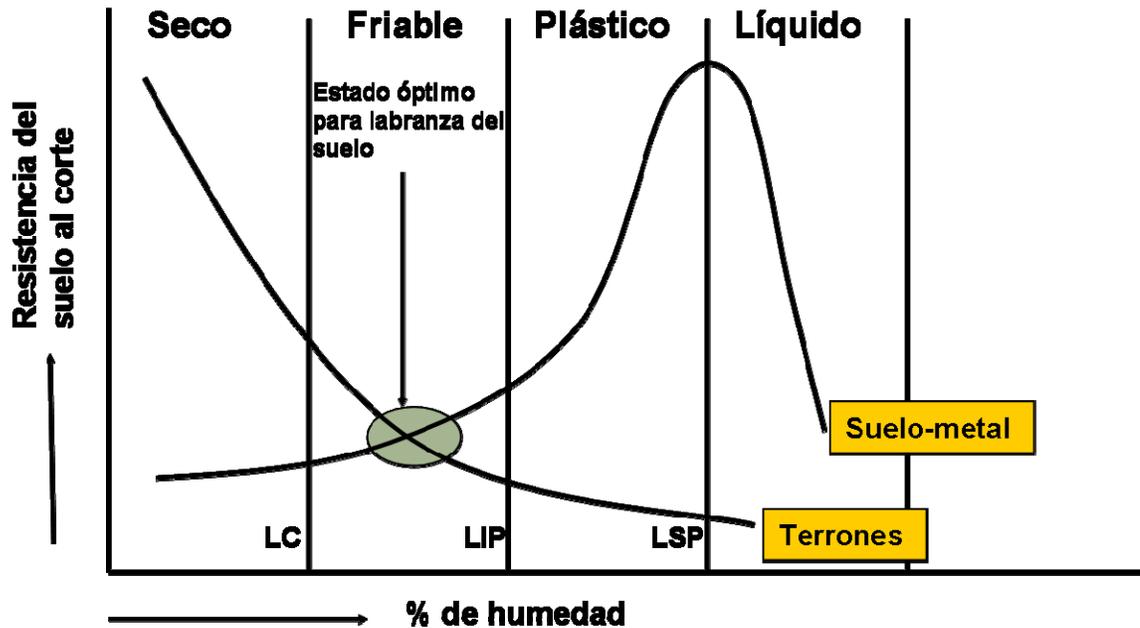


Figura 2.1 Estados de consistencia del suelo. Curvas de adhesión suelo-metal y cohesión molecular de los agregados.

Gavande (1982) establece que el buen estado físico del suelo es esencial para la disponibilidad de agua y aire a las raíces de las plantas. El abastecimiento de agua y oxígeno por el suelo y las necesidades propias de las plantas son muy variables y dependen: primero del abastecimiento externo del agua y características físicas del tipo de suelo y, segundo del estado de desarrollo de la planta y condiciones del clima. En la mayoría de los suelos, la capacidad de abastecimiento es menor que los requisitos de los cultivos para un alto rendimiento, por lo que se busca promover un óptimo estado físico del suelo a través del manipuleo mecánico o labranza.

Cadena *et al* (2002), realizaron un estudio en la zona tropical de Veracruz, México, para determinar los rangos laborables de dos tipos suelo. En este estudio el rango de laborabilidad de los suelos fue cuantificado determinando en campo los efectos de los implementos sobre la estructura del suelo y posteriormente midiendo la energía específica aplicada por la combinación tractor-implemento. Lo anterior se realizó dentro y fuera de los rangos del estado friable teórico del suelo. De este estudio se obtuvo como resultado que el rango laborable real en campo fue más pequeño que el estado friable teórico de los suelos.

Hoogmoed *et al* (2003), realizaron otro estudio en la zona Tropical de Veracruz, para determinar los rangos laborables del suelo. Este fue realizado en laboratorio. El límite seco de laborabilidad fue determinado mediante la prueba de la caída. Los resultados en términos de tensión de la humedad del suelo resultaron más bajos comparados con los de campo. Para la determinación del límite húmedo de laborabilidad (límite superior de laborabilidad) se realizó la prueba de permeabilidad del aire y una prueba de compresión.

Ambas pruebas demostraron que los límites estaban muy cerca de los determinados en campo.

## Compactación del Suelo

Tobias y Tietje (2007) modelaron la compactación del suelo en base al juicio de expertos para derivar reglas de decisión en cuanto a protección de suelos. Los expertos consideraron que dentro de las cualidades físicas para juzgar la compactación, el régimen de humedad y la estructura del suelo son los parámetros cualitativos más importantes. Dentro de los parámetros cuantitativos mencionaron al espacio poroso, la densidad aparente, contenido de arcilla y el esfuerzo de precompresión; siendo este último para ellos el más importante. Los suelos con porosidad del 7 %, densidad aparente de  $1.7 \text{ gr/cm}^3$  y esfuerzo de precompresión de 65 Kpa fueron considerados como muy susceptibles a la compactación.

Agroinformación (2000) especifica que la compactación del suelo corresponde a la pérdida de volumen que experimenta una determinada masa de suelo, debido a fuerzas externas que actúan sobre él. Estas fuerzas externas en la actividad agrícola tienen su origen principalmente en:

- Implementos de labranza del suelo.
- Cargas producidas por los neumáticos de tractores e implementos de arrastre.
- Pisoteo de animales.

Breland & Hansen (1996) mencionan que la compactación disminuye el volumen de poros totales y produce cambios en la distribución del tamaño de los mismos, ocasionando un mayor porcentaje de poros pequeños.

Baver et al (1980), establecen que a mayor aumento de la humedad en el suelo existe un “colchón” de agua entre las partículas minerales que forman los agregados por lo que éstas prácticamente pierden atracción entre ellas, esto es la cohesión molecular, este parámetro está en función del número de películas de agua entre ellas y varía inversamente proporcional al contenido de humedad, la tensión de las películas de agua entre las partículas coloidales que da a los suelos sus propiedades de cohesión permite que el suelo quede permanentemente moldeado en cualquier forma deseada; este intervalo de humedad corresponde al estado plástico del suelo y la cantidad de agua es el contenido de humedad con el que el suelo deja de ser friable pasando al estado plástico. En este estado de consistencia los agregados tienen su más baja resistencia a la fuerza que ejercen los implementos sobre ellos por lo que pueden ser fácilmente destruidas en su tamaño y arreglo, o sea perder completamente la estructura del suelo, hasta llegar al punto de compactación.

Gavande (1982) menciona que cuando un suelo débil se labra con un alto contenido de humedad, el agua almacenada en el agregado puede quedar libre, esto provoca una disminución de la succión del agua del suelo, como consecuencia del medio ambiente físico.

## **Efecto del Tráfico de Maquinaria Agrícola sobre la Porosidad del Suelo**

El espacio poroso ( $E_p$ ) es la porción de suelo no ocupada por partes sólidas. El espacio poroso está ocupado por aire y agua. El arreglo de las partículas sólidas del suelo determina la cantidad de espacio poroso. (Ortiz V. y Ortiz S., 1990).

Voorhees (1989) mencionan que la compactación del suelo en condiciones de campo es comúnmente causada por la labranza y el tráfico de ruedas, pudiendo reducir sustancialmente el rendimiento de los cultivos.

La disminución de la macroporosidad del suelo va a producir una baja capacidad de aireación y oxigenación del suelo, lo que va a generar una disminución de la actividad de las raíces y, consecuentemente, un menor crecimiento de éstas así como un menor volumen de suelo explorado y una reducción en la absorción de agua y nutrientes (Agroinformación 2000).

La compactación modifica la actividad bioquímica y microbiológica del suelo. El mayor impacto físico que se produce, es la reducción de la porosidad, lo que implica una menor disponibilidad tanto de aire como de agua para las raíces de las plantas. En los suelos agrícolas, como la compactación es causada sobre todo por la maquinaria pesada, se puede prevenir incrementando el número de ejes y ruedas de la maquinaria agrícola, aumentando la anchura de los neumáticos y reduciendo su presión. El uso de vehículos más pequeños y ligeros no es precisamente beneficioso, ya que requiere pasadas más

frecuentes, que pueden dar un efecto contrario al deseado. Otra medida preventiva para aplicar es lo referente a la planificación de las labores agrarias, por ejemplo evitar el uso de maquinaria pesada en condiciones de humedad alta. (D.O.T y M. A, 2001).

Para Gavande (1982) una de las propiedades físicas que se ve constantemente afectada, tanto por los implementos como por maquinaria agrícola, es la compactación del suelo. Es común encontrar en suelos que han sido trabajados constantemente con arado una capa compacta de 30 a 50 cm. de profundidad, llamada comúnmente, piso de arado. Además, a consecuencia de la compactación se reduce el espacio poroso, estos efectos son mayores cuando las labores se realizan en suelos con un cierto contenido de humedad. Este factor es muy importante y debe tomarse en cuenta al momento de efectuar las labores. El efecto benéfico producido por un implemento de labranza generalmente se nulifica por su uso excesivo, o por las labores realizadas con un contenido inapropiado de humedad del suelo. En estos casos, el valor de la consistencia del suelo es un dato muy importante, pues está relacionado con el contenido de humedad óptimo para efectuar la labranza. El laboreo del suelo en estado plástico o con una consistencia dura provoca siempre condiciones desfavorables, ya que a bajos contenidos de humedad las partículas no se unen y, por lo tanto, no toman agregados; y a altos contenidos de humedad, al secarse el suelo produce terrones grandes y compactos, el suelo debe manipularse a un contenido de humedad de consistencia friable.

Según Raper & Erbach (1990) para un suelo dado, la distribución de la compactación en el perfil es función de la carga aplicada, la presión ejercida por el rodado, el estado de humedad y la intensidad de tránsito recibida.

Smith & Dickson (1990) informaron que la compactación superficial se produce por la presión en la zona de contacto rueda-suelo, pero la subsuperficial es producida por el peso total del equipo.

Al respecto la empresa John Deere, (2000) establece que se debe tener en cuenta que es preferible tener una compactación (inevitable), uniformemente distribuida en el lote, a tener pocas huellas muy profundas.

Czyż (2004) realizó un estudio en varios suelos para cuantificar los efectos del tráfico de maquinaria agrícola sobre la aireación del suelo, la densidad aparente y crecimiento de la cebada. En este estudio se dice que las vueltas repetidas por un tractor en terreno plano de solamente cerca de 2 toneladas de peso, pueden producir condiciones de suelo en la cual la aireación puede estar limitada para el crecimiento del cultivo.

El uso de llantas dobles puede producir resultados más bajos de densidad aparente del suelo, asociado a una aireación más grande.

Concluye que la aireación del suelo es una componente muy importante dentro de las cualidades físicas del suelo.

## **Labranza, Estabilidad de Agregados y Agregación del Suelo**

Xiao *et al* (2006), realizaron un estudio sobre los efectos de los cultivos sobre el cambio temporal de carbón orgánico y la estabilidad de agregados en la región desértica de China. Los resultados obtenidos indicaron que los valores bajos de estabilidad de agregados se debieron a los bajos contenidos de MO, arcilla y limo. La arena en la superficie de los suelos provocó baja estabilidad. Se encontró una relación lineal directa entre la estabilidad de agregados contra arcilla y contenido de materia orgánica.

Al respecto Blair *et al* (2006), establecen que las áreas no cultivadas tienen alta estabilidad de agregados debido al alto contenido de materia orgánica, pero este último disminuye con el tiempo, a medida que el suelo es cultivado. Estos autores recomiendan la aplicación de abonos para incrementar el contenido de MO y la retención de humedad, dado que el incremento del carbón orgánico incrementa la estabilidad de agregados.

## Métodos para Estimar la Permeabilidad al Aire del Suelo

Los Cuerpos de Ingeniería del Ejército de Estados Unidos (USACE), (2002) describen varios métodos que se usan para estimar la permeabilidad al aire de un suelo dado. Mencionan que las estimaciones de la permeabilidad al aire se requieren para predecir o para evaluar el funcionamiento de un sistema usando los modelos analíticos y numéricos disponibles. Los métodos para medir la permeabilidad al aire del suelo son: método indirecto, de laboratorio y el método de campo.

### Método Indirecto

La permeabilidad al aire se puede estimar en función de la conductividad hidráulica saturada. La permeabilidad intrínseca se puede obtener a partir de la definición de la conductividad hidráulica saturada como:

$$k_i = \frac{K\mu}{\rho g}$$

Donde:

$K_i$  = permeabilidad intrínseca ( $m^2$ )

$K$  = conductividad hidráulica saturada ( $m/s$ )

$\mu$  = viscosidad dinámica del agua ( $gr/m\cdot s$ )

$\rho$  = densidad del agua ( $gr/cm^3$ )

$g$  = constante de gravitación ( $m/s^2$ )

## **Métodos de Laboratorio**

### **Distribución del tamaño del grano**

La permeabilidad al aire en función del radio medio del poro se puede estimar muy aproximadamente, a través de los análisis de tamaño de grano realizados en muestras del suelo usando la siguiente relación:

$$K_i = 0.125 r^2$$

Donde:  $K_i$  = Permeabilidad intrínseca,  $r$  = características del radio del poro, definido como:

$$r = c D_{15}$$

Donde:  $c$  = constante empírica aproximadamente igual a 0.1 para arena y grava,  $D_{15}$  = tamaño del grano para el cual 15% por peso de partículas son pequeñas. Entonces combinando las ecuaciones anteriores tenemos:

$$K = 1.250 D_{15}^2$$

### **Prueba de la columna**

Otro método de laboratorio es la prueba de columna, en la cual un permeámetro es sujeto a un gradiente de presión y mediante esto se puede también estimar la permeabilidad al aire de un suelo dado.

## **Método de Campo**

### **Prueba de la bomba neumática**

La prueba de la bomba neumática ofrece una alternativa para calcular la permeabilidad al aire. Esta prueba es capaz de caracterizar una larga porción de la zona no saturada en cada localización de la prueba. Muchos investigadores han desarrollado soluciones transitorias de estado estable de flujo de aire, los cuales pueden ser usados para el análisis de la prueba de la bomba neumática.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

### **Localización Geográfica**

Esta investigación se realizó en las instalaciones de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), la cual se encuentra ubicada en la exhacienda de Buenavista, localizada a 7 km al sur de Saltillo, Coahuila, México. Las coordenadas geográficas extremas que la delimitan son: 100° 59' 57" de longitud oeste, 25° 23' 42" de latitud norte y una altitud de 1743 msnm. De acuerdo a la clasificación climática de Koppen, modificada por García (1973), el clima de Buenavista es "Bsohw", que significa muy árido, semicálido, con régimen de lluvias en verano e invierno seco extremoso. La temperatura media anual es de 19.8 °C, con una precipitación media anual de 455 mm, la evaporación media anual oscila entre los 1956 mm. Los vientos predominantes tienen una dirección noreste, con velocidades de 22.5 km/hr (González, 1999).

## Características de los Suelos Analizados

Los suelos analizados fueron colectados de diferentes regiones geográficas del país (Figura 4.1), las cuales se enlistan a continuación:

De la región Norte se analizaron suelos de los estados de Tamaulipas, Coahuila y Durango; de la región Sureste suelos del Estado de Chiapas; de la región Centro se analizó un suelo del Estado de Hidalgo; de la región Occidente un suelo del Estado de Jalisco; y de la región Oriente del país suelos del centro del Estado de Veracruz.

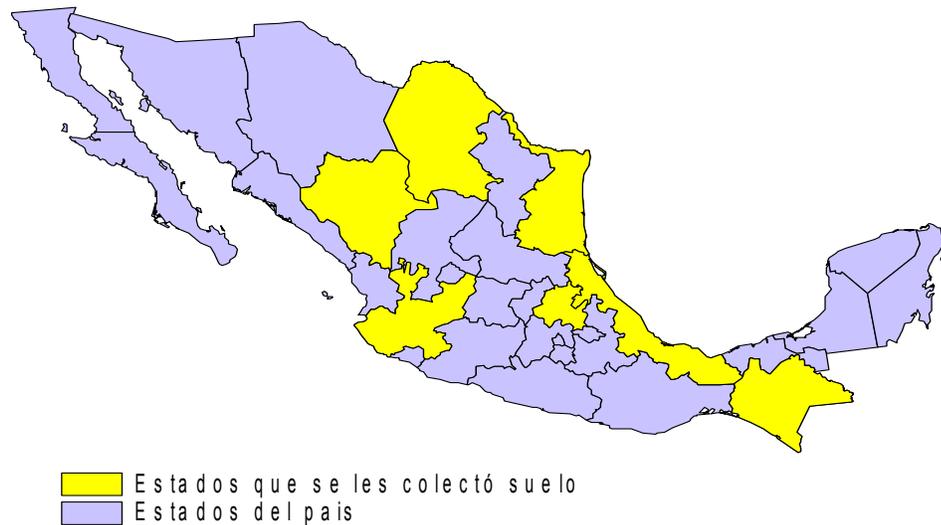


Figura 3.1 Estados del país que se les colectó suelo

Los suelos evaluados y las características como textura, materia orgánica y LSL, se presentan en la siguiente tabla.

**Tabla 4.1 Suelos analizados**

| No. | Localidad          | %<br>Arena | %<br>Limo | %<br>Arcilla | %<br>MO | LSL   |
|-----|--------------------|------------|-----------|--------------|---------|-------|
| 1   | Laureles gris      | 7.85       | 63.65     | 28.50        | 4.90    | 34.86 |
| 2   | Laureles negro     | 33.00      | 33.00     | 34.00        | 2.57    | 25.55 |
| 3   | Sinaloa negro      | 34.00      | 31.00     | 35.00        | 2.27    | 24.21 |
| 4   | Durango negro      | 27.40      | 38.60     | 34.00        | 1.90    | 25.28 |
| 5   | Narro Bajío        | 38.50      | 36.25     | 25.25        | 2.09    | 20.67 |
| 6   | Narro Maquinaria   | 32.00      | 46.00     | 22.00        | 1.86    | 24.98 |
| 7   | Jame Bosque        | 28.00      | 34.25     | 37.75        | 12.59   | 44.57 |
| 8   | Jame huerta        | 31.25      | 36.75     | 32.00        | 11.80   | 38.33 |
| 9   | Los Ángeles        | 18.00      | 46.50     | 35.50        | 5.84    | 35.56 |
| 10  | Reforestación      | 37.00      | 37.00     | 26.00        | 6.29    | 31.23 |
| 11  | Tamaulipas         | 21.25      | 42.25     | 36.50        | 3.23    | 25.55 |
| 12  | Álamo Veracruz     | 5.50       | 23.00     | 71.50        | 4.82    | 43.04 |
| 13  | Comalapa           | 50.00      | 11.00     | 39.00        | 1.22    | 21.48 |
| 14  | Tepatitlán Jalisco | 13.75      | 40.00     | 46.25        | 1.05    | 30.28 |
| 15  | Hidalgo            | 9.75       | 47.25     | 43.00        | 4.04    | 38.84 |
| 16  | Tres valles Arturo | 40.50      | 37.00     | 22.50        | 1.24    | 21.67 |
| 17  | Tres valles Fco.   | 65.50      | 8.50      | 26.00        | 1.60    | 18.55 |
| 18  | Independencia      | 35.00      | 30.50     | 34.50        | 5.17    | 30.97 |
| 19  | Cotaxtla migajón   | 35.30      | 38.30     | 26.30        | 2.30    | 25.40 |

## Preparación y Procesamiento de las Muestras

Se realizó la prueba de permeabilidad al aire a 19 suelos representativos del país para determinar el límite superior de laborabilidad (LSL) de cada muestra.

El objetivo principal fue determinar un modelo estadístico que relacione el LSL (variable de respuesta) con las variables de textura y el porcentaje de materia orgánica (variables regresoras). Para tal efecto se analizaron suelos contrastantes en cuanto a textura y contenido de materia orgánica.

Los suelos seleccionados se tamizaron a través de dos mallas, una de 2.4 y otra de 4.0 mm de abertura (Figura 3.1) para obtener partículas de suelo comprendidas entre 2.4 y 4 mm de DMA (Diámetro Medio de Agregados).



Figura 3.2 Tamices de 2.4 y 4.0 mm

En la Figura 3.2 se observan suelos de diferentes texturas y contenidos de materia orgánica, que fueron tamizados por las mallas descritas.



Figura 3.3 Suelos tamizados

Una vez que el suelo fue tamizado, se prepararon muestras a seis contenidos de humedad, desde consistencia seca hasta plástica (Figura 3.3), mediante el siguiente procedimiento:

Se pesó suelo con la balanza de precisión (Figura 3.4) y se colocó en una bolsa de plástico con la finalidad de que la muestra no perdiera humedad; se le agregó agua por medio de un aspersor de plástico (Figura 3.5) hasta obtener la humedad requerida, la cual se calculó por medio de la fórmula:

$$M_w = \frac{(\% H * P_{ss})}{100}$$

Donde:

$M_w$  = Peso del agua (gr)

%H = Porcentaje de humedad requerida (%)

$P_{ss}$  = Peso del suelo seco (gr)



Figura 3.4 Suelos asperjados desde seco hasta plástico.



Figura 3.5 Balanza de precisión.



Figura 3.6 Aspersor

## Contenido de Humedad de las Muestras

Para calcular el contenido de humedad de las muestras se utilizó el método gravimétrico, para esto se obtuvo el peso del suelo húmedo ( $P_{sh}$ ) justo antes de realizarles la prueba de compactación a las muestras. El peso de suelo seco ( $P_{ss}$ ) se obtuvo cuando las muestras se llevaron a la estufa y fueron sometidas a una temperatura de 105 °C durante 24 horas, transcurrido el tiempo se retiraron de la estufa y fueron pesadas nuevamente.

Obtenidos estos valores, el contenido de humedad se calculó con la fórmula:

$$\% H = \left[ \frac{P_{sh} - P_{ss}}{P_{ss}} \right] * 100$$

Donde:

% H= Contenido de humedad (%)

$P_{sh}$  = Peso del suelo húmedo (gr)

$P_{ss}$  = Peso del suelo seco (gr)

## Prueba de Compactación

Para la compactación de las muestras, el procedimiento fue el siguiente:

Se llenó un cilindro de acero de aproximadamente  $100 \text{ cm}^3$  (5 cm de diámetro) con partículas de suelo tamizadas en la fracción de 2.8 - 4 mm. La muestra fue llevada a la prensa neumática simuladora de compactación previamente calibrada; posteriormente fue comprimida gradualmente hasta que alcanzara una presión de 0.40 Mpa, tal y como lo muestra la Figura 3.6. Este valor de presión, según Perdok y Hendrikse (1982), es utilizado con el objeto de simular carga por el paso de maquinaria agrícola sobre el suelo.



Figura 3.7 Prensa neumática simuladora de compactación

## Prueba de Permeabilidad al Aire

La muestra, previamente compactada, fue llevada al permeámetro de aire (Figura 3.7); y una vez colocada se midió el tiempo que tardó el flotador en recorrer 5 cm de la barra conductora.

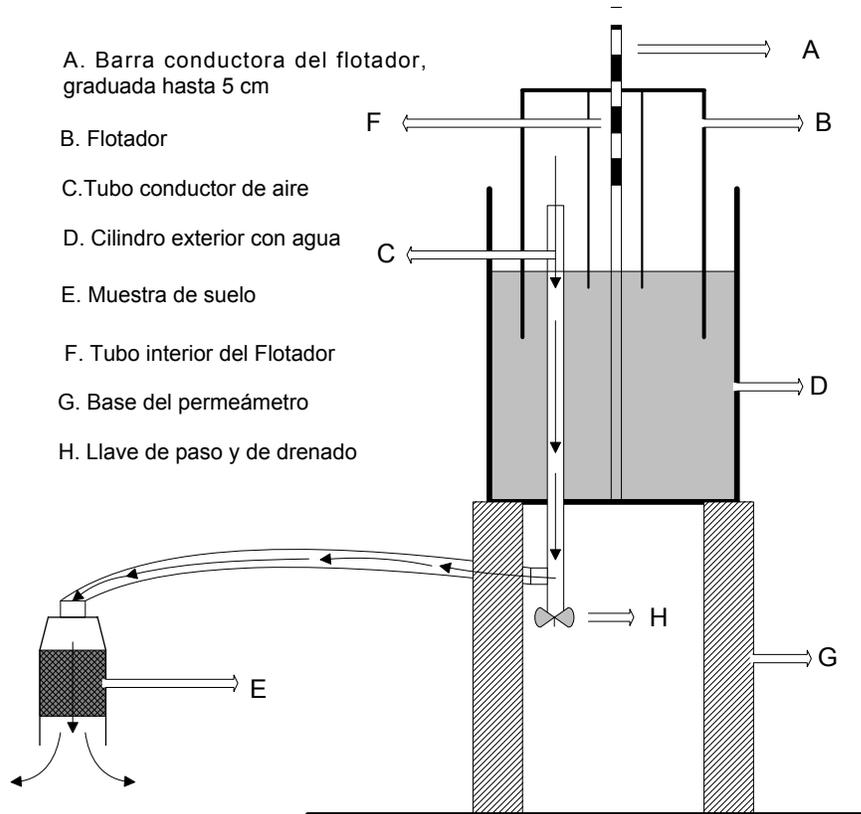


Figura 3.8 Permeámetro y descripción de sus partes

La altura después de la compresión se obtuvo al medir la distancia de la parte de arriba del cilindro hasta el suelo comprimido por medio de un micrómetro (Figura 3.8).

Además, se midió la temperatura ambiente al momento de realizar la prueba para determinar la viscosidad dinámica del aire (Ver apéndice 1).



Figura 3.9 Micrómetro para medir la longitud de compactación de la muestra.

Teniendo los valores anteriores, la permeabilidad al aire fue calculada por medio de la fórmula (Kmoch, 1962):

$$K_a = V \eta L t^{-1} A^{-1} P^{-1}$$

Donde:

$K_a$  = Permeabilidad intrínseca para flujo de aire ( $m^2$ )

$V$  = Volumen de aire ( $m^3$ )

$\eta$  = Viscosidad dinámica del aire ( $Pa \cdot s$ )

$L$  = Longitud de la muestra comprimida (m)

$t$  = Tiempo que tardó el flotador en recorrer 5 cm (s)

$A$  = Área de sección transversal de la muestra ( $m^2$ )

$P$  = Presión del aire (Pa).

## Determinación de la Textura de los Suelos

Para determinar la textura de los suelos se empleó la técnica de separación mecánica de partículas (Kilmer y Alexander (1949), modificada por López *et al* [2006]). Este método da una aproximación más exacta de las partículas minerales de los suelos en estudio, ya que consiste en agrupar el tamaño de las fracciones de arena, limo y arcilla de manera separada.

A continuación se describe la técnica:

Se pesan 10 gr de suelo, tamizado a 2 mm y tratado previamente con peróxido de hidrogeno al 30%.

El suelo se “lava” por medio de un tamiz de pruebas físicas de 0.05 mm (50 micras). Las partículas que no pasan a través del tamiz son las arenas (según la clasificación del USDA son partículas entre 2 y 0.05 mm de diámetro medio). Las partículas que sí pasan a través del tamiz son los limos (partículas entre 0.05 a 0.002 mm) y las arcillas (partículas menores a 0.002 mm).

A la solución (agua-suelo) resultante se le agregan 30 ml de Hexametáfosfato de Sodio (dispersante) y es llevada a un agitador eléctrico por 10 minutos, pasado el tiempo se coloca la solución en una probeta y se afora a 1 litro.

Posteriormente se agita 40 veces por medio de una varilla metálica (agitador manual) y se deja reposar por 16 horas. Después del reposo, con el uso de un sifón (Figura 3.9) se retira el suelo que está a 20 cm de profundidad.

El suelo que se obtiene con el sifón son las arcillas. Las muestras tanto de arena como de arcilla son llevadas a la estufa de secado a 105 °C por 24 horas, transcurrido el tiempo se pesan para conocer el contenido de ambas fracciones.

Los cálculos que se realizan son:

Arena= Peso de suelo que no paso en el tamiz (gr)

Arcilla= Suelo obtenido con el sifón después del reposo de 16 horas (gr)

Limo= 10 gr – gr de arcilla – gr de arena, (gr)



Figura 3.10 Uso de sifón para obtener las arcillas a 20 cm de profundidad

## Contenido de Materia Orgánica

Para la obtención del porcentaje de materia orgánica (MO) se empleó el método de Walkey y Black (1934) el cual consiste en la oxidación del carbono orgánico contenido en el suelo mediante agentes oxidantes fuertes,  $\text{KMnO}_4$ ,  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ , en medio ácido.

La metodología es la siguiente:

Se pesa 1 gr. de suelo tamizado a 2 mm y se coloca en un matraz Erlenmeyer de 500 ml. Se le agregan al suelo y a una muestra testigo (Matraz sin suelo) 10 ml de Dicromato de Potasio ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ) 1N.

Posteriormente se miden 20 ml de Ácido Sulfúrico concentrado ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) y se agregan a ambos matraces; luego se les adhieren 200 ml de agua destilada y 4 gotas de Orto-fenantrolina, se agitan levemente y se espera a que las muestras se enfríen por media hora, después de esto se titulan con Sulfato Ferroso. La titulación consiste en medir el volumen consumido (ml) de sulfato ferroso justo cuando la solución cambia (vira) de color verde a marrón.

Los cálculos que se realizan son los siguientes:

$$\% \text{ MO} = \frac{(\text{ml } \text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 * \text{N}_1 - \text{ml de Fe SO}_4 * \text{N}_2) * \text{C}}{\text{W}}$$

Donde:

MO= Materia Orgánica (%)

N<sub>1</sub>= Normalidad del Dicromato de Potasio

N<sub>2</sub>= Normalidad del Sulfato Ferroso

W= Peso de la muestra (gr)

C= Constante (igual a 0.68)

### **Análisis Estadístico**

A cada suelo se le determinó el LSL por medio de la prueba de permeabilidad al aire (método descrito arriba) y los análisis correspondientes de textura y MO. Por lo tanto se obtuvo un banco de datos teniendo al LSL en % de humedad gravimétrica; los porcentajes de arena, limo y arcilla (textura); y al contenido de materia orgánica.

Se usó el paquete estadístico R para realizar un análisis de regresión múltiple. El LSL fue la variable de respuesta y a los porcentajes de arena, limo, arcilla y materia orgánica fueron las variables independientes.

### **El modelo lineal**

El modelo lineal, de acuerdo a Faraway (2005) se define como:

$$Y = X\beta + \varepsilon$$

Donde:

$Y = [y_1, y_2, \dots, y_n]$ , es el vector de respuesta

$$X = \begin{bmatrix} X_0 & X_{11} & X_{21} & X_{31} \dots & X_{p1} \\ X_0 & X_{12} & X_{22} & X_{32} \dots & X_{p2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_0 & X_{1n} & X_{2n} & X_{3n} \dots & X_{pn} \end{bmatrix}, \text{ es la matriz de observaciones}$$

$\beta = [\beta_0, \beta_1, \beta_2 \dots \beta_n]$ , es el vector de parámetros de regresión

$\varepsilon = [\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n]$ , es un vector de errores

A  $X\beta$  se le conoce como la parte estructural del modelo, mientras que  $\varepsilon$  representa la parte aleatoria, donde se supone que:

$$\varepsilon \sim N(0, \sigma^2 I)$$

Es decir:

$$\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2) \quad \forall_i = 1, 2, \dots, n$$

$$E(\varepsilon_i) = 0 \quad \forall_i = 1, 2, \dots, n$$

$$Cov(\varepsilon_i \varepsilon_j) = \begin{cases} \sigma^2 & i=j \\ 0 & i \neq j \end{cases}$$

Conforme al enfoque de mínimos cuadrados los estimadores de los parámetros del modelo son:

$$\hat{\beta} = (X'X)^{-1} X'Y \quad \text{y} \quad \hat{\sigma}^2 = SCE/(n-p)$$

Donde:

$SCE = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2$ ,  $\varepsilon_i = (y_i - \hat{y})^2$ ,  $n$ =numero de observaciones y  $p$ =número de parámetros de regresión.

La distribución de beta es:

$$\hat{\beta} \sim N(\beta, (X'X)^{-1}\sigma^2)$$

El intervalo de confianza para una observación futura esta dado por

$$\hat{y} \pm t_{n-p}^{\alpha/2} \hat{\sigma} \sqrt{1 + x_0 (X'X)^{-1} x_0}$$

## **Verificación de los supuestos del modelo**

### **Parte estructural**

El ajuste de la parte estructural del modelo es medido mediante el coeficiente de determinación, el cual se denota como  $R^2$  y se define mediante:

$$R^2 = 1 - SCE/SCT$$

Donde:

$$SCE = \text{Suma de cuadrados del error} = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$$

$$SCT = \text{Suma de cuadrados totales} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$$

Un valor de  $R^2$  cercano a 1 indica que la parte estructural del modelo es adecuada, mientras que un valor cercano a cero indica lo contrario.

## **Parte aleatoria**

Para verificar los supuestos acerca de los errores, se usaron pruebas estadísticas e inspección gráfica. Los supuestos a verificar son los siguientes:

1. Normalidad en los errores: Este supuesto indica que los errores se distribuyen según una distribución normal de media cero y varianza constante ( $\sigma^2$ ).

Se usó la prueba de Shapiro-Wilk (Shapiro y Wilk, 1965) para verificar la normalidad en los residuales, esta prueba estadística esta diseñada para contrastar las siguientes hipótesis:

$H_0$ = Los errores se distribuyen normalmente

$H_1$ =Los errores se distribuyen no normales

2. Independencia: Los errores deben ser independientes, es decir, sin autocorrelación o correlación serial.

Se aplicó la prueba de Durbin-Watson (Durbin and Watson, 1951) para detectar no correlación en los errores. Esta prueba contrasta las siguientes hipótesis:

$H_0$ = Los errores están correlacionados

$H_1$ = Los errores no están correlacionados

3. Homocedasticidad: La varianza en el error [Var ( $\epsilon$ )], debe ser constante, es decir,  $\text{Var}(\epsilon_1) = \text{Var}(\epsilon_2) = \text{Var}(\epsilon_3) = \dots = \text{Var}(\epsilon_n)$ .

Para verificar varianza constante se empleó el método de inspección gráfica y una prueba de igualdad de varianza entre subconjuntos de los errores.

La inspección gráfica consiste en verificar visualmente los valores ajustados contra los residuales en el modelo. Si la varianza es constante, los puntos en la dirección vertical de la gráfica deben ser más o menos simétricos respecto a la línea horizontal ( $h=0$ ), (Faraway, 2005). Por su parte la prueba de igualdad de varianzas, está diseñada para comprobar homogeneidad de varianzas entre dos grupos de datos. En nuestro contexto, la utilizamos para comprobar igualdad de varianzas en dos subconjuntos de errores.

### **Validación del modelo**

Para validar el modelo se utilizó el método de validación cruzada. Ésta técnica es una herramienta estadística estándar para estimar el error de predicción.

El error de predicción (EP) se refiere al valor esperado (E) de la diferencia entre una respuesta futura ( $y$ ) y su predicción ( $\hat{y}$ ), elevados al cuadrado.

Es decir:

$$EP = E(y - \hat{y})^2$$

El procedimiento para aplicar esta técnica, de acuerdo con Efron y Tibshirani (1993), es el siguiente:

1. Dividir los datos en  $K$  subconjuntos aproximadamente iguales en tamaño.
2. Dejar fuera, para entrenamiento, un subconjunto y ajustar el modelo para las otras  $K-1$  partes de los datos. Posteriormente, se calcula el error de predicción del modelo ajustado al predecir los datos que conforman el grupo de entrenamiento.
3. Repetir los pasos anteriores para  $k=1,2,\dots,K$  y combinar los  $K$  errores de predicción estimados.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Resultados del Ajuste y Análisis de Varianza de la Regresión

Se usó el paquete estadístico R para realizar un análisis de regresión múltiple, las variables que mejor predijeron al LSL fueron los porcentajes de materia orgánica, arcilla y limo.

El modelo ajustado resultó ser:

$$LSL = 1.5446 * MO + 0.4243 * Ar + 0.2387 * Li$$

Con una R<sup>2</sup> igual a 0.996

Donde:

LSL = Límite Superior de Laborabilidad en % de humedad gravimétrica

MO = % Materia Orgánica

Ar = % Arcilla

Li = % limo

En la tabla 4.2 se muestra el resumen del ajuste de la regresión, del cual se puede establecer que la parte estructural del modelo es adecuada, puesto que el coeficiente de determinación indica que el modelo explica el 99 % de la variabilidad total.

De las variables independientes, se distingue la materia orgánica con una mayor pendiente, y por lo tanto ésta tiene un mayor efecto (impacto) en la respuesta (LSL). Por otra parte, la arcilla impacta en la respuesta casi el doble que el limo.

**Tabla 4.2 Resumen del ajuste**

| Variable | Coeficiente | Error estándar | t-value | P-value      | $R^2 = 0.996$ |
|----------|-------------|----------------|---------|--------------|---------------|
| MO       | 1.54464     | 0.15271        | 10.115  | 2.34e-08 *** |               |
| Ar       | 0.42434     | 0.02946        | 14.406  | 1.40e-10 *** |               |
| Li       | 0.23866     | 0.02842        | 8.398   | 2.94e-07 *** |               |

Códigos de Significancia: 0 \*\*\*\* 0.001 \*\*\* 0.01 \*\* 0.05 ! 0.1 ' ' 1,  
Error residual estándar: 2.09

En la tabla 4.3 se muestra el análisis de varianza de la regresión. Se observa que todos los estimadores son altamente significativos.

**Tabla 4.3 Análisis de varianza de la regresión**

| Variable | G.L | Suma de cuadrados | Cuadrado medio | F- value | P – value     |
|----------|-----|-------------------|----------------|----------|---------------|
| MO       | 1   | 13599.5           | 13599.5        | 3113.62  | < 2.2e-16 *** |
| Ar       | 1   | 906.5             | 906.5          | 703.83   | 1.182e-14 *** |
| Li       | 1   | 3074.2            | 3074.2         | 207.54   | 1.398e-10 *** |
| Error    | 16  | 69.9              | 4.4            |          |               |

Códigos de Significancia: 0 \*\*\*\* 0.001 \*\*\* 0.01 \*\* 0.05 ! 0.1 ' ' 1

## **Supuestos del Modelo de Regresión**

Siendo que  $R^2$  es igual a 0.996 se tiene evidencia que la parte estructural del modelo es adecuada. Para validar los supuestos de la parte aleatoria del modelo, se requiere de ciertos diagnósticos que, de acuerdo a Faraway (2005), son usados para detectar problemas y, dado el caso, proponer mejoras e incluso cambiar el modelo.

### **Prueba de normalidad en los errores**

La prueba de Shapiro-Wilk es ampliamente usada para probar normalidad de un conjunto de datos; en nuestro caso se usa para verificar si los errores se distribuyen como normales.

La prueba se realizó a los residuales del modelo. El resultado obtenido fue el siguiente:

#### **Shapiro-Wilk normality test**

**data: residuals(g1.lm)**

**W = 0.956, p-value = 0.497**

Con lo que no se rechaza la hipótesis de normalidad, puesto que el p-value es mayor que 0.05

## **Prueba de correlación serial**

La prueba de Durbin-Watson es un método estándar para detectar correlación serial en los residuales.

La prueba se le realizó sobre los errores del modelo ajustado, el algoritmo para el cálculo de la autocorrelación se encuentra en la librería lmtest (Linear Models Test, por sus siglas en inglés), el resultado se detalla a continuación:

### **Durbin-Watson test**

**data: g1.lm**

**DW = 1.8007, p-value = 0.2562**

Con lo que no rechazamos la hipótesis de no correlación serial puesto que el p-value es mayor a una significancia de 0.05.

## **Prueba para varianza constante u Homocedasticidad**

Faraway (2005) establece que la inspección gráfica es más efectiva para detectar si la varianza de los errores es constante (homocedasticidad). Para comprobar si hay homocedasticidad se grafican los datos ajustados contra los residuales o errores. En la Figura 4.2 se observa varianza constante, porque los puntos en la dirección vertical de la gráfica son aproximadamente simétricos con respecto a la línea horizontal ( $h=0$ ).

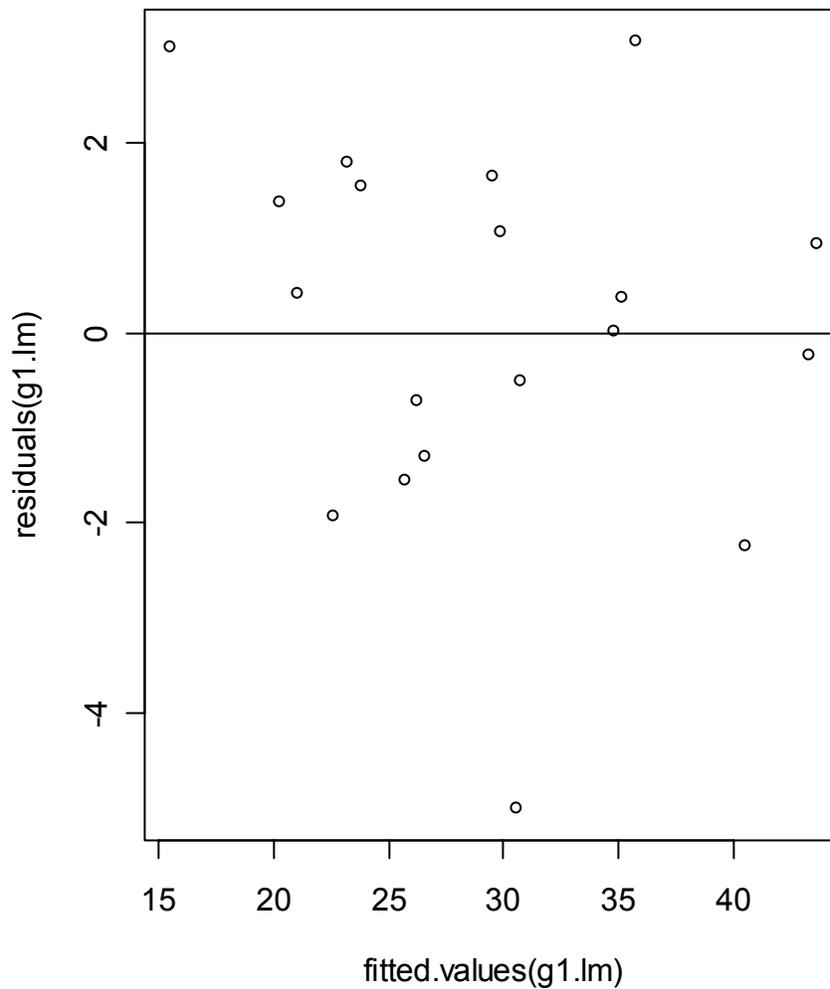


Figura 4.1 Inspección Gráfica para detectar varianza constante

Otro método para detectar varianza constante es realizar una prueba de igualdad de varianzas sobre subconjuntos de los datos de residuales. Aquí la aplicamos a dos subconjuntos de errores, uno (grupo1.g1) conformado con los residuales cuyo valor ajustado es menor que 29 y el otro (grupo2.g1) con los residuales cuyo valor ajustado es mayor a 29. En seguida se presenta el resultado de la prueba:

**var.test(grupo1.g1,grupo2.g1)**

**F test to compare two variances**

**data: grupo1 and grupo2**

**F = 0.6109, num df = 8, denom df = 9, p-value = 0.4989**

La varianza se puede suponer constante puesto que se obtiene un p-value mayor a 0.05.

De acuerdo a las pruebas realizadas, podemos afirmar que no existen problemas de correlación serial y de no normalidad en los errores. Asimismo la inspección visual de la gráfica y la prueba de igualdad de varianzas indican que se tiene homogeneidad en la varianza.

### **Resultados de la Validación del Modelo**

Para la validación del modelo, dividimos los datos en dos subconjuntos de manera aleatoria y aplicamos la técnica de validación cruzada (CV) descrita en la metodología, los resultados indicaron lo siguiente:

**Modelo ajustado con todos los datos (modelo original)**

$LSL = 1.5446*MO + 0.4243*Ar + 0.2387*Li \quad R^2 = 0.996$

Error Predicción= 3.68

### **Primer modelo ajustado aplicando CV**

Casos dejados fuera para entrenamiento: [3, 8, 12, 14, 15, 16, 17, 18, 19]. Con los casos restantes, el modelo ajustado resultó ser:

$$LSL=1.7889*MO + 0.2359*Li + 0.3803*Ar, R^2= 0.996,$$

$$EP= 3.35$$

### **Segundo Modelo ajustado aplicando CV**

Casos dejados para entrenamiento: [13, 11, 2, 10, 6, 7, 1, 4, 5, 9], el modelo ajustado resultó ser:

$$LSL=1.3141*MO + 0.2719*Li + 0.4311*Ar, R^2=0.9972,$$

$$\text{Error de Predicción}= 2.29$$

De acuerdo con la técnica de validación cruzada, el modelo ajustado para esta investigación es estable por las siguientes razones:

1. Los coeficientes ajustados para los dos modelos no presentan mucha diferencia a los ajustados en el modelo original, así como sus valores de  $R^2$ .
2. El error de predicción para ambos modelos es pequeño e incluso no sobrepasan al del modelo original.

## CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos en laboratorio; de acuerdo con los objetivos establecidos y la hipótesis planteada se concluye lo siguiente:

Se obtuvieron buenos resultados puesto que el LSL en términos de humedad gravimétrica sí fue una función de la textura y contenido de materia orgánica y por lo tanto fue posible determinar un modelo matemático correlacionando estas variables.

De las variables regresoras la materia orgánica, la arcilla y el limo fueron las que mejor se ajustaron al modelo matemático buscado y por lo tanto las que mejor predicen al LSL. La arena no presentó buen ajuste por lo que fue descartada del modelo.

De acuerdo con el resumen del ajuste y el análisis de varianza de la regresión, la materia orgánica se distingue como la variable que mayor efecto (impacto) presenta en la respuesta. Por otra parte, de las variables que involucran textura, la arcilla impacta en la respuesta casi el doble que el limo, pero presentan menor pendiente en relación con la materia orgánica. Por lo tanto la MO resultó estadísticamente más significativa que la textura en el modelo buscado.

Del análisis de regresión múltiple se obtuvo un coeficiente de determinación  $R^2=0.996$ , el cual indica excelente ajuste y por lo tanto hay evidencia que la parte estructural del modelo es adecuada puesto que explica el 99% de la variabilidad total.

De los supuestos del modelo, los errores se distribuyen normalmente y no hay correlación serial en los mismos. Asimismo, la inspección gráfica y la prueba de homogeneidad de varianzas indican que la varianza en el error es constante.

De acuerdo con la prueba de validación cruzada el modelo es estable puesto que presenta un error de predicción de 3.6, esto indica que se pueden hacer predicciones con bastante precisión.

El modelo está listo para hacer predicciones dado que el objetivo fue verificar si el modelo matemático podía predecir adecuadamente el LSL y así tomar decisiones adecuadas para efectuar las labores de preparación del suelo antes de que éste llegue al punto de compactación.

Por último y como trabajo futuro se sugiere hacer la calibración del modelo directamente en el campo para corroborar lo obtenido en laboratorio; de esta forma el modelo será parte de una herramienta que permitirá a los productores que usen maquinaria agrícola decidir el momento adecuado para realizar labranza.

## LITERATURA CITADA

- Agroinformación, 2000.** “La compactación del suelo”. Documento Web, disponible en: [http://www.abcagro.com/riego/compactacion\\_suelos.asp](http://www.abcagro.com/riego/compactacion_suelos.asp) (consultada el 15 octubre 2004).
- Ashburner J. E. y Sims B. G., 1984.** Elementos de diseño del tractor y herramientas de labranza. Ed. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), San José, Costa Rica, 473 pp.
- Baver L. D., Gardner W. H. y Gardner, W. R. 1980.** Física de suelos. 1ª. Ed. en español, México. Unión tipográfica Editorial Hispano-Americana, S. A. 529 pp.
- Bell M. A. and Van Keulen H., 1995.** Soil pedotransfer functions for four Mexican soils. Soil Science Society of America journal. Vol. 59, # 3, pp. 865-871
- Blair Nelly, Faulkner R. D., Till A. R., Poulton P. R., 2006.** Long-term management impacts on soil C, N and physical fertility. Part I: Broad balk experiment. Soil and Tillage Research. 91:30-38.
- Bonilla M. Carlos y Cancino V. José, 2001.** Estimación del contenido de humedad del suelo mediante el empleo de funciones de pedotransferencia. Agric. Téc., Vol. 61, No.3, p.326-338.
- Braunack M. V. and J. E. McPhee., 1991:** “The effect of initial soil water content and tillage implement on seedbed formation”, Soil & Tillage Research, 20, pp. 5-17.
- Breland T. A. and Hansen S., 1996.** Nitrogen mineralization and microbial biomass as affected by soil compaction. Soil Biology Biochemistry. Amsterdam, Netherlands. Ed. Elsevier. v.28, n.4, p.655-663.
- Cadena Z. M., Campos M. S., Cantú S. M., Zermeño G. A., 2006.** Evaluación de funciones de edafotransferencia para estimar la curva de retención de humedad para uso en la planeación de labranza. Artículo aceptado para su publicación en terra latinoamericana.
- Cadena Z. M., Hoogmoed W. B., Perdok U.D., 2002.** Field studies to asses the workable range of soils in the tropical zone of Veracruz, Mexico. Soil and Tillage research, 68: 83-92.

- Departamento de Organización Territorial y Medio Ambiente (D.O.T. y M.A.), 2001.** (Documento Web consultado el 10 de septiembre de 2004)  
Disponible en:  
[http://www.euskadi.net/vima\\_suelo/compactacion\\_c.htm#medidas](http://www.euskadi.net/vima_suelo/compactacion_c.htm#medidas).
- Dexter A.R. and M. Birkas, 2004.** Prediction of the soil structures produced by tillage. *Soil and Tillage research*, 79:153-166.
- Durbin J. and Watson G. S., 1951.** Testing for serial correlation in least squares regression II, *Biometrika*, 38, 159-178.
- Ewa A. Czyż, 2004.** Effects of traffic on soil aeration, bulk density and growth of spring barley. *Soil and Tillage Research*, 79:129-133.
- FAO, 1983.** Guidelines: land evaluation for rainfed agriculture. Rome, FAO Soils Bulletin 52.
- Efron B. and Tibshirani R. J., 1993.** An Introduction to the Bootstrap. Chapman and Hall. USA. Pp. 436.
- Faraway J. J., 2005.** Practical Regression and Anova using R. Chapman and Hall/CRC editors. pp. 213.
- Gavande Sampat A., 1982.** Física de suelos principios y aplicaciones Ed. Limusa. 4ª reimpresión, México. pp 351.
- Goense, D., 1987.** Mechanized farming in the humid tropics with special reference to soil tillage, workability and time liness of farm operations. A case study for the Zanderij area of Suriname. PhD Thesis Wageningen Agricultural University, Wageningen, The Netherlands.
- Gonzalez H. G. 1999.** Levantamiento de suelos a nivel detallado del campo experimental “El bajío” UAAAN. Tesis de licenciatura. UAAAN, Buenavista, Saltillo, Coahuila, México, pp. 13-28.
- Graybill Franklin A., Iyer Hariharan K., 1994.** Regression analysis: Concepts and applications. Duxbury Press, International Thomson Publishing U.S.A., pp. 701.
- Herve, N. 1993.** Decisiones de labranza, consecuencias sobre el suelo y los cultivos. Problemática del altiplano boliviano. *Revista de Agricultura Boliviana*, 50(24), 12-22.
- Hoogmoed, W. B., Cadena Zapata, M., Perdok, U. D., 2000.** Methodology to Determine Workability Thresholds in the Laboratory for Typical Soils in the Tropical Zone of Veracruz, Mexico. 15th Conference of the

International Soil Tillage Research Organization 2-7 JULY 2000 Fort Worth, Texas, USA.

**Hoogmoed, W. B., Cadena Zapata, M., Perdok, U. D., 2003.** Laboratory assessment of the workable range of soils in the tropical zone of Veracruz, Mexico. *Soil and Tillage Research*, 74:169-178.

**Imhoff Silvia, Pires Da Silva Alvaro, Fallow David, 2004.** Susceptibility to Compaction, Load Support Capacity, and Soil Compressibility of Hapludox *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68:17–24.

**John Deere, 2000.** “Como prevenir la compactación”. Documento Web consultado el 10 de octubre de 2004. Disponible en: [http://www.deere.com.ar/es\\_AR/ag/homepage/consejo/cs021\\_TractorDT.html](http://www.deere.com.ar/es_AR/ag/homepage/consejo/cs021_TractorDT.html)

**Keller Thomas, Arvidsson Johan y Dexter Anthony R., 2007.** Soil structure produced by tillage as affected by soil water content and physical quality of soil. *Soil and Tillage Research*. 92: 45-52.

**Kilmer V. J. and Alexander L. T., 1949.** Methods of making mechanical analyses of soil. *American Society of Agronomy*. Vol 9. Pp. 15-25.

**Klenin N. I., 1986:** *Agricultural machines: Theory of operation, computation of controlling parameters and the conditions of operation*, pp.9-60, Ed. A.A. Balkema/Rotterdam, USSR.

**Kmoch, H. G., 1962.** *Die Luftdurchlässigkeit des Bodens, ihre Bestimmung und ihre Bedeutung für einige ackerbauliche Probleme*. Bornträger, Berlin Germany, 90 pp.

**López C. R., Gallegos del T. A., Peña C. E., Reyes L. A., Castro F. R., Chávez G. J., 2006.** Sustancia húmicas de origen diverso en algunas propiedades físicas de un suelo franco-arcillo-limoso. *Terra* 24 (3):303-311.

**Mott Robert L., 1996.** *Mecánica de fluidos aplicada*. Ed. Prentice Hall, 4ª edición, México. pp. 572.

**Nemes A., Schaap M. G. and Wosten J. H. M., 2003.** Functional Evaluation of Pedotransfer Functions Derived from Different Scales of Data Collection. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67:1093–1102.

**Ojeda Mario Miguel, 2006.** La modelación estadística. Documento web consultado el 15 de agosto de 2007. Disponible en [http://www-eio.upc.es/research/gresa/files/tfiles/modelacion\\_.pdf](http://www-eio.upc.es/research/gresa/files/tfiles/modelacion_.pdf)

- Ortiz Villanueva B. y Ortiz Solorio C. A., 1990.** Edafología., 7<sup>a</sup> edición, Universidad Autónoma Chapingo, México. pp 394.
- Pachepsky Y., Rawls W.J., 2004.** Development of pedotransfer functions in soil hydrology. Edit. ELSERVIER. Hardbound, pp. 542.
- Perdok U.D., Hendrikse L. M., 1982.** Workability test procedure for arable land. In: Proceedings of the Ninth International Conference on ISTRO, Osijek, Yugoslavia, June 21-25, 1982, pp. 511-519.
- Pineda M. T., Ramírez A. J. M., Chavez A. N., Fagundo, G. P., 1996.** Efecto del contenido de humedad sobre las operaciones de labranza. Revista Chapingo 1996. Ingeniería Agrícola 3, pp. 91-96
- Rapper R. and Erbach D., 1990.** Prediction of soil stresses using the finite element method. Transaction of the ASAE. St. Joseph, v.33, n.3, p.725-730.
- Saxton K. E. and Rawls W. J., 2006.** Soil Water Characteristics Estimates by texture and organic matter for hidrologic solutions. Soil Sci. Soc. Am. J. 70: 1569-1578.
- Shapiro, S. S. and Wilk, M. B., (1965).** "An analysis of variance test for normality (complete samples)", *Biometrika*, 52, 3 and 4, pages 591-611.
- Silva A. P., Imhoff S., Tormena C.A., 2006.** Least limiting water range of soils: a key tool for soil management in Brazil and Argentina. International Soil Tillage Research Organisation 17th Triennial Conference - Kiel, Germany. pp. 508-512
- Slowinska-Jurkiewicz, A., 1994.** Changes in the structure and physical properties of soil during spring tillage operations. *Soil Tillage Res.*, 29: 397-407.
- Smith D. L., Dickson J.W., 1990.** Contributions of weight and ground pressure to soil compaction. *Journal of Agricultural Engineering Research*, Silsoe, UK . v.43, p.13-29.
- Stafford, J.V., 1982.** The concept of a soil failure index in the operation of tillage implements. Proceedings of the 9th Int. Conf. ISTRO, Osijek, Yugoslavia, pp. 420-428.
- Stolte J., Wesseling J.G., Wosten J. H. M., 1996.** Pedotransfer functions for hydraulic and thermal properties of soil and the tool HERCULES. Wageningen (The Netherlands), DLO Winand Staring Centre Report 126. 40 pp.

- Tobias S., Tietje O., 2007.** Modelling experts' judgments on soil compaction to derive decision rules for soil protection- A case study from Switzerland. Soil and tillage research. Vol (92) pp. 129-143
- U. S. Army Corps of Engineers, 2002.** Apendix D. Documento Web disponible en: <http://www.usace.army.mil/net/usace-docs/eng/manuals/em1110-1-4001/a-d.pdf>, consultada el 24 de agosto de 2004
- Vilar Fernandez J. 2006.** Modelos de Regresión Lineal, simple y múltiple. Documento web consultado el 26 de mayo de 2007. Disponible en: [http://www.udc.es/dep/mate/estadistica2/sec9\\_1.html](http://www.udc.es/dep/mate/estadistica2/sec9_1.html)
- Voorhees, W.B., 1989.** Root activity related to shallow and deep compaction. In: Lason, L.E. (ed.) Mechanics and related processes in structured agricultural soil. Morris, MN: Kleuwer Academic Publishers. pp.173-186.
- Walkey A. y Black C. A., 1934.** An examination of the Dejtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the Chromic aciditration method. Soil Sci. 37:29-38
- Wosten J. H. M., Nemes Lilly A., Le Bas C., 1998.** Using existing siol datato derive hydraulic parameter for simulation models in environmental studies and in land use planning. Final report on the European Union Founded Project. Repor 156 DLO Staring Centre, Wageningen, The Netherlandas.
- Xiao Gang Li, Feng Min Li, Zed Rengel, Bhupinderpal Singh, Zhe Feng Wang, 2006.** Cultivation effects on temporal changes of organic carbon and aggregate stability in desert soil of Hexi Corridor in China. Soil and Tillage Research. 91:22-29.
- Zahera Hafida, Caronb Jean and Ouakic Bennaceur, 2005.** Modeling Aggregate Internal Pressure Evolution following Immersion to Quantify Mechanisms of Structural Stability. Soil Sci. Soc. Am. J. 69:1-12.
- Zhang X. Y., Cruse R. M., Sui Y. Y., Jhao Z., 2006.** Soil Compaction Induced by Small Tractor Traffic in Northeast China. Soil Sci. Soc. Am. J. Soil & Water Management & Conservation, 70:613–619.

## APÉNDICE A

**Tabla A1. Viscosidad dinámica del aire a diferentes temperaturas**

| Temperatura(°C) | Viscosidad(Pa*s) |
|-----------------|------------------|
| -40             | 1.51E-05         |
| -30             | 1.56E-05         |
| -20             | 1.62E-05         |
| -10             | 1.67E-05         |
| 0               | 1.72E-05         |
| 10              | 1.77E-05         |
| 20              | 1.81E-05         |
| 30              | 1.86E-05         |
| 40              | 1.91E-05         |
| 50              | 1.95E-05         |
| 60              | 1.99E-05         |
| 70              | 2.04E-05         |
| 80              | 2.09E-05         |
| 90              | 2.13E-05         |
| 100             | 2.17E-05         |
| 110             | 2.22E-05         |
| 120             | 2.26E-05         |

Fuente: Robert L. Mott. Mecánica de fluidos aplicada.

Ecuación de regresión lineal:

$$Y = 1.712941176 \cdot 10^{-5} + 4.647058824 \cdot 10^{-8} X$$

$$r^2 = 0.99$$

Donde:

Y=Viscosidad dinámica del aire (Pa\*s)

X=Temperatura ambiente (°C)

## APÉNDICE B

EJEMPLO DE UN SUELO ANALIZADO EN EL PAQUETE ESTADÍSTICO R

### SUELO TAMAULIPAS

```
> data= read.csv ("tesistam.csv")
> data
      H      Ka      h      Ka
15.40 1.66E-10 15.53 1.94E-10
17.86 7.00E-11 17.98 6.01E-11
21.56 7.47E-12 21.71 1.04E-11
24.61 8.32E-13 24.46 1.36E-12
27.64 8.64E-14 27.66 8.34E-14
30.53 9.99E-14 30.31 8.20E-14
15.45 2.41E-10 15.46 1.78E-10
18.06 7.45E-11 17.98 8.72E-11
21.92 1.15E-11 21.45 9.47E-12
24.56 8.34E-13 24.60 1.60E-12
27.35 8.34E-14 27.65 7.95E-14
30.66 9.48E-14 30.59 8.52E-14
15.26 1.97E-10 15.34 1.90E-10
17.90 8.18E-11 17.72 8.06E-11
21.51 8.12E-12 21.49 1.04E-11
24.56 2.22E-12 24.51 2.18E-12
27.85 8.90E-14 27.80 8.38E-14
30.65 8.76E-14 30.39 9.11E-14

> h= data$h
> ka= data$ka
> ka1= log10(ka)
> ka1
[1]-9.779 -10.154 -11.126 -12.079 -13.063 -13.000 -9.617
-10.127 -10.939 -12.078
[11]-13.078 -13.023 -9.705 -10.087 -11.090 -11.653 -13.050
-13.057 -9.712 -10.221
[21]-10.982 -11.866 -13.078 -13.086 -9.749 -10.059 -11.023
-11.795 -13.099 -13.069
[31]-9.721 -10.093 -10.982 -11.661 -13.076 -13.040
```

```

> m=lm(kal~h)
> summary(m)
Call:
lm(formula = kal ~ h)
Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.5258   -0.1248    0.0544    0.1929    0.3408

Coefficients:
              Estimate Std. Error  t value Pr(>|t|)
(Intercept) -5.851768   0.189133   -30.94  <2e-16 ***
            h     -0.245018  0.008035   -30.50  <2e-16 ***
---
Signif. Codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.2537 on 34 degrees of freedom
Multiple R-Squared: 0.9647, Adjusted R-squared: 0.9637
F-statistic: 929.9 on 1 and 34 DF, p-value: < 2.2e-16

Prueba de Shapiro.test para verificar normalidad en los
residuales
> shapiro.test (m$res)

                Shapiro-Wilk normality test

data:  m$res
W = 0.9216, p-value = 0.01405

Prueba de Durbin-Watson para detectar correlación serial
> library(lmtest)
> dwtest(m)

                Durbin-Watson test

data:  m
DW = 2.7444, p-value = 0.9885

```

**Tabla B1. Resumen del ajuste cuadrático**

|   |  |                             |
|---|--|-----------------------------|
| <b>Correlación serial<br/>(P-value &gt; 0.05)</b> | <b>Normalidad<br/>(P-value &gt; 0.05)</b>                | <b>R<sup>2</sup>=0.9647</b> |
| <b>No tiene problemas</b>                         | <b>Los errores no tienen<br/>una distribución normal</b> | <b>Buen ajuste</b>          |

Como los datos no son normales hacemos la transformación de Box-Cox de la siguiente manera:

```
> library(MASS)
> boxcox(-ka1~h,lambda=seq(-2.5,2,length=20))
```

Valor de Lamba elegido = -1

```
> g=lm (-ka1^(-1)~h)
> summary(g)
```

Call:

```
lm(formula = -ka1^(-1) ~ h)
```

Residuals:

|  | Min        | 1Q        | Median    | 3Q        | Max       |
|--|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|  | -3.469e-03 | 1.102e-03 | 7.143e-05 | 1.159e-03 | 3.162e-03 |

Coefficients:

|             | Estimate   | Std. Error | t value | Pr(> t )   |
|-------------|------------|------------|---------|------------|
| (Intercept) | 1.320e-01  | 1.413e-03  | 93.46   | <2e-16 *** |
| h           | -1.905e-03 | 6.001e-05  | -31.74  | <2e-16 *** |

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.001895 on 34 degrees of freedom  
Multiple R-Squared: **0.9674**, Adjusted R-squared: 0.9664  
F-statistic: 1007 on 1 and 34 DF, p-value: < 2.2e-16

Realizamos nuevamente las pruebas de Shapiro.test y de Durbin-Watson a los datos transformados, para detectar normalidad y correlación serial respectivamente.

```

> shapiro.test (g$res)
      Shapiro-Wilk normality test
data:  g$res
W = 0.956, p-value = 0.1609
> dwtest(g)
      Durbin-Watson test
data:  g
DW = 2.3496, p-value = 0.8428

```

**Tabla B2. Resumen del nuevo ajuste**

|   |  |                             |
|---|--|-----------------------------|
| <b>Correlación serial<br/>(P-value &gt; 0.05)</b> | <b>Normalidad<br/>(P-value &gt; 0.05)</b>            | <b>R<sup>2</sup>=0.9647</b> |
| <b>No tiene<br/>problemas</b>                     | <b>Los errores se distribuyen<br/>como normales.</b> | <b>Buen<br/>ajuste</b>      |

```

> x=seq(15,32,0.1)

> y=1/(-0.132+0.001905*x)

> plot(kal~h,main="LSL Suelo Tamaulipas",xlab="% de
humedad",ylab="Log Permeabilidad,m²")

> lines(x,y,lwd="2",col="blue")

>abline(v=25.55,lty=3)

> abline(h=-12,lty=3)

> legend(20,-13,"LSL=25.55")

> legend(20,-9.85,"R²=0.97")

> legend(16,-9.5,"Y=1/(-0.132+0.001905*X)")

```

### LSL Suelo Tamaulipas

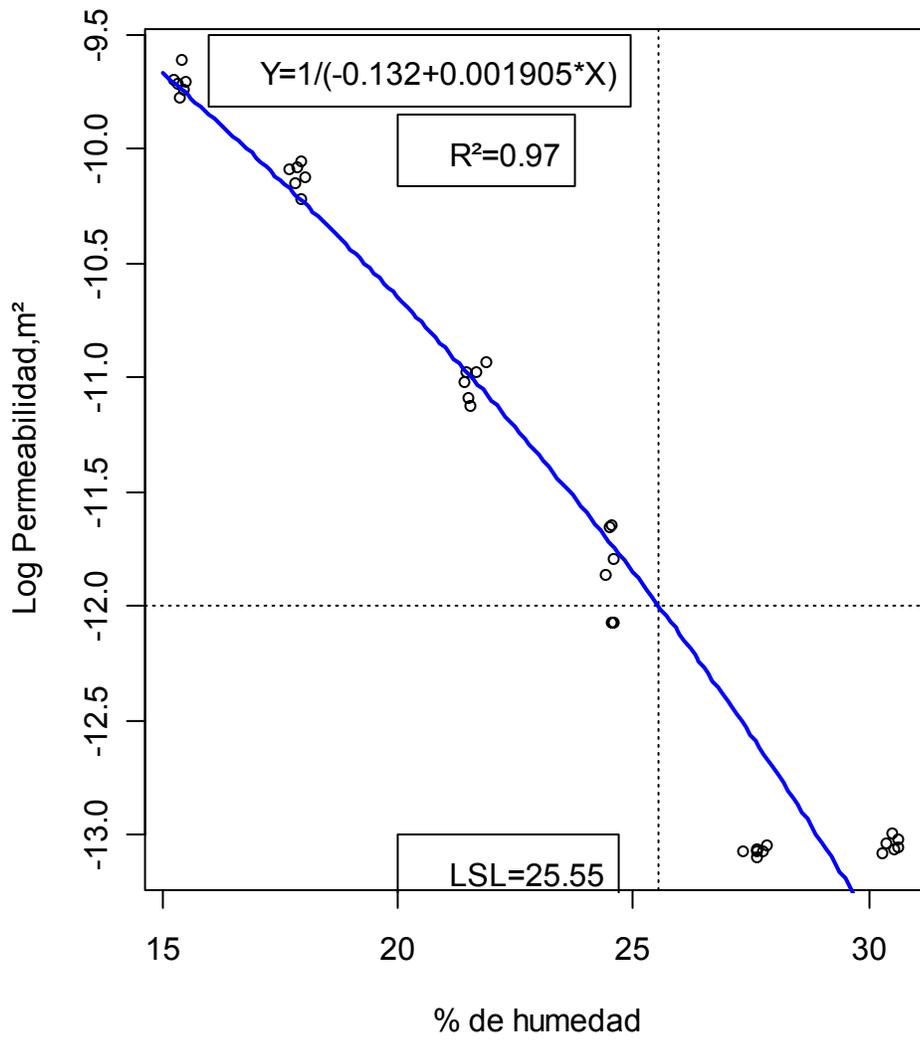


Figura B1. Límite superior de laborabilidad de la localidad Tamaulipas

## APÉNDICE C

### PROCESO DE ELECCIÓN DEL MODELO

Se creo un Scrip en R que contiene todo el algoritmo para la selección del modelo, a continuación se presenta el proceso:

### Análisis de regresión múltiple del modelo en R

#### DATOS DE LSL, TEXTURA Y MATERIA ORGANICA DE LAS LOCALIDADES MUESTREADAS

```
> data = read.csv("mario.csv")
```

```
> data
```

| Localidad          | %<br>Limo | %<br>Arcilla | %<br>MO | LSL   |
|--------------------|-----------|--------------|---------|-------|
| Laureles gris      | 63.65     | 28.50        | 4.90    | 34.86 |
| Laureles negro     | 33.00     | 34.00        | 2.57    | 25.55 |
| Sinaloa negro      | 31.00     | 35.00        | 2.27    | 24.21 |
| Durango negro      | 38.60     | 34.00        | 1.90    | 25.28 |
| Narro Bajío        | 36.25     | 25.25        | 2.09    | 20.67 |
| Narro Maquinaria   | 46.00     | 22.00        | 1.86    | 24.98 |
| Jame Bosque        | 34.25     | 37.75        | 12.59   | 44.57 |
| Jame huerta        | 36.75     | 32.00        | 11.80   | 38.33 |
| Los Ángeles        | 46.50     | 35.50        | 5.84    | 35.56 |
| Reforestación      | 37.00     | 26.00        | 6.29    | 31.23 |
| Tamaulipas         | 42.25     | 36.50        | 3.23    | 25.55 |
| Álamo Veracruz     | 23.00     | 71.50        | 4.82    | 43.04 |
| Comalapa           | 11.00     | 39.00        | 1.22    | 21.48 |
| Tepatitlán Jalisco | 40.00     | 46.25        | 1.05    | 30.28 |
| Hidalgo            | 47.25     | 43.00        | 4.04    | 38.84 |
| Tres valles Arturo | 37.00     | 22.50        | 1.24    | 21.67 |
| Tres valles Fco    | 8.50      | 26.00        | 1.60    | 18.55 |
| Independencia      | 30.50     | 34.50        | 5.17    | 30.97 |
| Cotaxtla migajón   | 38.30     | 26.30        | 2.30    | 25.40 |

## Proceso de ajuste del modelo seleccionado

1. Modelo con todas las variables lineales

```
> g.lm = lm(lsl ~ mo + li + Ar, data)
> summary(g.lm)
```

Call:

```
lm(formula = lsl ~ mo + li + Ar, data = data)
```

Residuals:

| Min    | 1Q     | Median | 3Q    | Max   |
|--------|--------|--------|-------|-------|
| -4.854 | -1.129 | 0.553  | 1.092 | 3.601 |

Coefficients:

|             | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t )     |
|-------------|----------|------------|---------|--------------|
| (Intercept) | 2.31750  | 2.39777    | 0.967   | 0.349107     |
| mo          | 1.53957  | 0.15312    | 10.055  | 4.65e-08 *** |
| li          | 0.20965  | 0.04137    | 5.068   | 0.000139 *** |
| Ar          | 0.39058  | 0.04573    | 8.541   | 3.81e-07 *** |

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 2.094 on 15 degrees of freedom  
Multiple R-Squared: 0.9393, Adjusted R-squared: 0.9272  
F-statistic: 77.43 on 3 and 15 DF, p-value: 2.346e-09

2. El intercepto no es significativo a 0.05, omitimos el intercepto y volvemos a ajustar

```
> g1.lm = lm(lsl ~ mo + li + Ar -1, data)
> summary(g1.lm)
```

Call:

```
lm(formula = lsl ~ mo + li + Ar - 1, data = data)
```

Residuals:

| Min     | 1Q      | Median | 3Q     | Max    |
|---------|---------|--------|--------|--------|
| -5.0109 | -1.0088 | 0.3777 | 1.4616 | 3.0764 |

Coefficients:

|    | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t ) |     |
|----|----------|------------|---------|----------|-----|
| mo | 1.54464  | 0.15271    | 10.115  | 2.34e-08 | *** |
| li | 0.23866  | 0.02842    | 8.398   | 2.94e-07 | *** |
| Ar | 0.42434  | 0.02946    | 14.406  | 1.40e-10 | *** |

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 2.09 on 16 degrees of freedom  
Multiple R-Squared: 0.996, Adjusted R-squared: 0.9953  
F-statistic: 1342 on 3 and 16 DF, p-value: < 2.2e-16

3. Tenemos un mejor modelo con una  $R^2$  muy alta, lo que indica excelente ajuste

```
> anova(g1.lm)
```

Analysis of Variance Table

Response: lsl

|           | Df | Sum Sq  | Mean Sq | F value | Pr(>F)    |     |
|-----------|----|---------|---------|---------|-----------|-----|
| mo        | 1  | 13599.5 | 13599.5 | 3113.62 | < 2.2e-16 | *** |
| li        | 1  | 3074.2  | 3074.2  | 703.83  | 1.182e-14 | *** |
| Ar        | 1  | 906.5   | 906.5   | 207.54  | 1.398e-10 | *** |
| Residuals | 16 | 69.9    | 4.4     |         |           |     |

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

## # Diagnósticos

1. Normalidad

```
> shapiro.test(residuals(g1.lm))
```

Shapiro-Wilk normality test

data: residuals(g1.lm)

W = 0.956, **p-value = 0.497**(Tenemos normalidad en los residuales)

## 2. Correlacion serial

```
> require(lmtest)
Loading required package: lmtest
Loading required package: zoo

Attaching package: 'zoo'

The following object(s) are masked from
package:base :
  rapply

[1] TRUE
> dwtest(g1.lm)

Durbin-Watson test

data:  g1.lm
DW = 1.8007, p-value = 0.2562 (No tenemos correlación
serial)
```

## 3. Varianza constante

### 3.1 Inspeccion grafica

```
> plot(fitted.values(g1.lm), residuals(g1.lm))
> abline(h = 0)
```

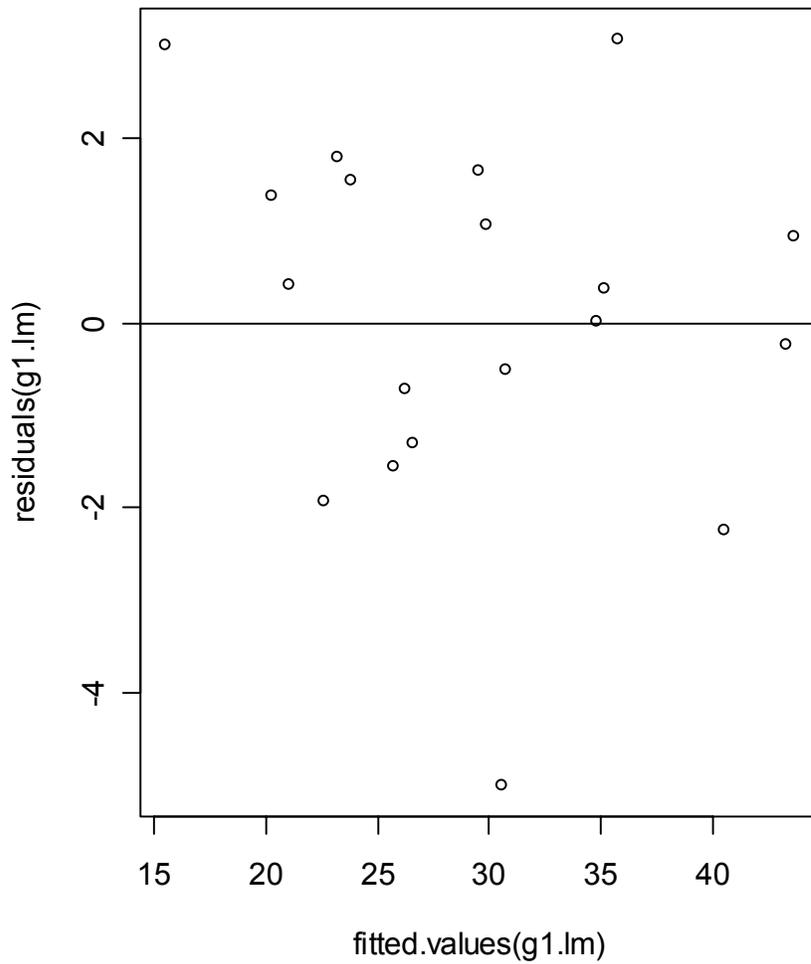


Figura C1. Prueba de Homocedasticidad

### 3.2 Prueba de homogeneidad de varianzas

```
> grupo1 = residuals(g1.lm)[ fitted.values(g1.lm) < 29]
```

```
> grupo1
```

|  |            |            |            |            |           |
|--|------------|------------|------------|------------|-----------|
|  | 2          | 3          | 4          | 5          | 6         |
|  | -0.7230203 | -1.5466614 | -1.2945858 | -1.9242227 | 1.7932665 |
|  | 13         | 16         | 17         | 19         |           |
|  | 0.4209464  | 1.3766700  | 3.0170857  | 1.5465993  |           |

```
> grupo2 = residuals(g1.lm)[ fitted.values(g1.lm) > 29]
```

```
> grupo2
```

```

          1          7          8          9
0.00707011  0.93012083 -2.24628236  0.37765410
          10         11         12         14
1.65105717 -5.01090279 -0.23476552 -0.51396762
          15         18
3.07643292  1.06539375

```

```
> var.test(grupo1, grupo2)
```

F test to compare two variances

```
data: grupo1 and grupo2
```

```
F = 0.6109, num df = 8, denom df = 9, p-value = 0.4989
alternative hypothesis: true ratio of variances is not
equal to 1
```

```
95 percent confidence interval:
```

```
0.1489232 2.6617315
```

```
sample estimates:
```

```
ratio of variances
      0.6108765
```

```
> require(MASS)
```

```
Loading required package: MASS
```

```
[1] TRUE
```

```
> boxcox(g1.lm, lambda = seq(0.5, 1.5, by=0.02))
```

Según figura C2, no es necesario transformar puesto que el valor de lambda es igual a 1.

```
# Doble validación cruzada
```

```
> n = length(data$li)
```

```
> uno = sample(1:n,10)
```

```
> uno
```

```
[1] 13 11 2 10 6 7 1 4 5 9
```

```
> dos = c(3,8,12,14,15,16,17,18,19)
```

```
> dos
```

```

[1] 3 8 12 14 15 16 17 18 19
> g1 = lm(lsl ~ mo + li + Ar - 1, data, subset=uno)
> g2 = lm(lsl ~ mo + li + Ar - 1, data, subset=dos)
> summary(g1)

Call:
lm(formula = lsl ~ mo + li + Ar - 1, data = data, subset =
uno)

Residuals:
      Min       1Q   Median       3Q      Max
-2.049096  -0.943997  -0.002646   1.042019   1.919640

Coefficients:
      Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
mo  1.54440    0.12282   12.574 4.64e-06 ***
li  0.23903    0.03010    7.942 9.55e-05 ***
Ar  0.41784    0.02557   16.341 7.83e-07 ***
---
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 1.588 on 7 degrees of freedom
Multiple R-Squared: 0.9982, Adjusted R-squared: 0.9975
F-statistic: 1320 on 3 and 7 DF, p-value: 5.368e-10

```

```

> summary(g2)

Call:
lm(formula = lsl ~ mo + li + Ar - 1, data = data, subset =
dos)

Residuals:
      Min       1Q   Median       3Q      Max
-2.2902  -0.9636   0.2808   1.0104   2.9276

```

Coefficients:

|    | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t ) |     |
|----|----------|------------|---------|----------|-----|
| mo | 1.31410  | 0.21522    | 6.106   | 0.000880 | *** |
| li | 0.27189  | 0.04474    | 6.077   | 0.000902 | *** |
| Ar | 0.43111  | 0.03755    | 11.480  | 2.62e-05 | *** |

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 2.027 on 6 degrees of freedom  
**Multiple R-Squared: 0.9972,** Adjusted R-squared: 0.9958  
F-statistic: 708.1 on 3 and 6 DF, p-value: 4.882e-08

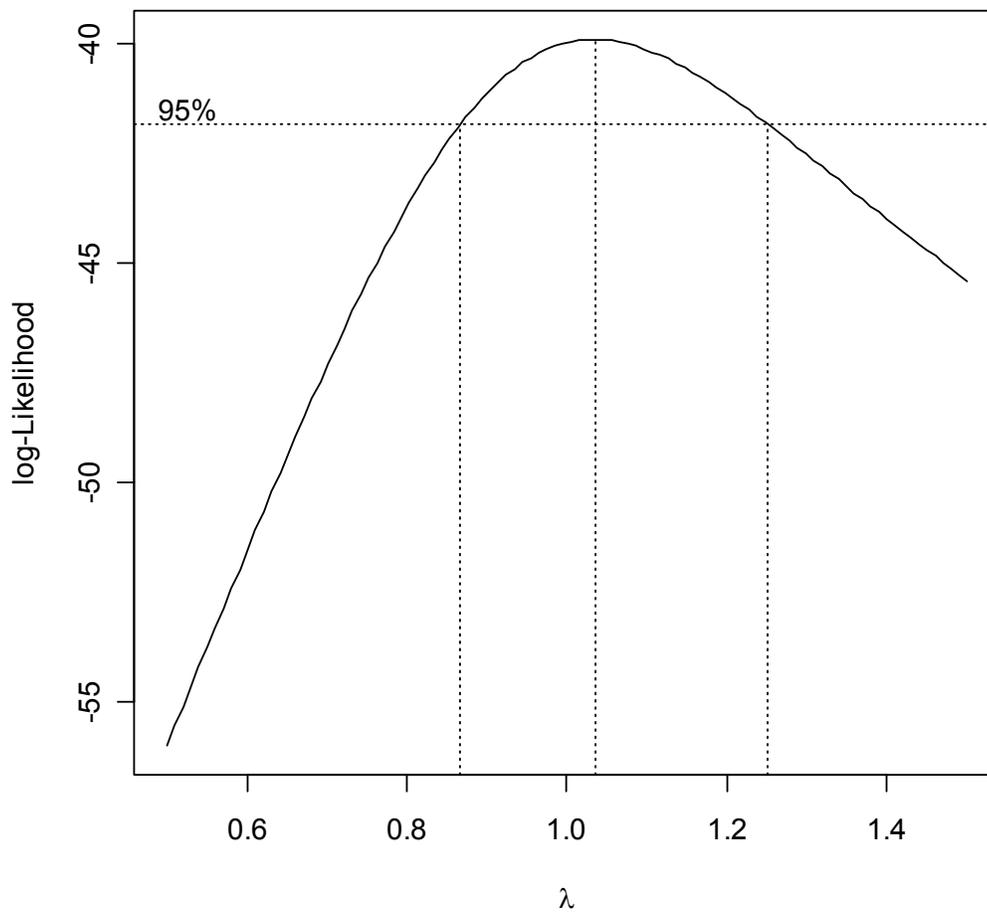


Figura C2. Transformación de Box-Cox