

UNIVERSIDAD DE BELGRANO
FACULTAD DE INGENIERÍA



TITULO DE LA TESINA

DESARROLLO DE UN MODELO PREDICTIVO PARA LOS LÍMITES DE ATTERBERG EN SUELOS DE LA REGIÓN PAMPEANA CON DIFERENTE PORCENTAJE DE ARCILLA Y CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA Y LA EVALUACIÓN DE LA EXPANSIVIDAD POR MÉTODOS INDIRECTOS.

Alumno: Galo Sebastián Gaibor Tacuri
Matrícula: 80107388

Tutor: Ing. Gabriel Aníbal Celentano

Trabajo final de Carrera de: Ingeniería Civil

Buenos Aires – 7 de julio del 2021

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado a mi familia, especialmente a ms amados padres y hermano Marco, quienes me han respaldado todo este tiempo, y han confiado plenamente en mí.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por sus bendiciones, concediéndome salud y entendimiento para culminar con éxito mis estudios.

A mi tutor de tesina, Ing. Gabriel Celentano, por haber dado su voto de confianza y respaldo en este trabajo.

Al Ing. Mario Castiglioni, quien me otorgó la idea de la tesina, y me brindó su absoluto apoyo durante todo este tiempo.

A mi hermano Marco, por haberme acompañado en mi etapa universitaria y por contar con su inconmensurable ayuda y cariño en todo lo que yo necesitaba

A mis amigos que me estiman y respaldan, especialmente a Josué de la Cuadra y su distinguida familia, quienes me han brindado su solidaridad y amistad en estos años de universidad.

A la Cátedra de Manejo y Conservación de suelos (FAUBA) por toda su colaboración en el trabajo realizado.

A mis amados padres, quienes confiaron en mis capacidades y me dieron todo su amor y amparo para finalizar mi carrera.

A toda mi familia por apoyarme.

RESUMEN

Desarrollo de un modelo predictivo para los límites de Atterberg en suelos de la Región Pampeana con diferente porcentaje de arcilla y contenido de materia orgánica y la evaluación de la expansividad por métodos indirectos.

El suelo es un factor esencial en la implementación de la construcción de ingeniería civil. Cada región tiene diferentes características y propiedades naturales de los suelos, por lo que deben ser evaluados. Una de las pruebas para determinar esas propiedades son los límites de Atterberg. El objetivo de este trabajo fue desarrollar un modelo predictivo para los límites de Atterberg y la evaluación de la expansividad por métodos indirectos en suelos de la Región Pampeana. Se tomaron 43 muestras superficiales de suelos pampeanos. Se analizó: LL (límite líquido), LP (límite plástico), IP (índice plástico), porcentaje de partícula (arcilla, limo, arena), MO (Materia Orgánica), CIC (Capacidad de Intercambio Catiónico) y COLE (coeficiente de extensibilidad lineal). Los análisis estadísticos fueron ACP (Análisis de Componentes Principales), regresión lineal y análisis de correlación de Pearson. Las variables que explicaron el modelo predictivo para el LL fueron arcilla y MO con un ajuste lineal del 74% y para el LP fue el LL con un ajuste polinomial del 69%. Se encontró una alta correlación ($r=0,79$) entre el LL y arcilla; y una correlación negativa con la arena ($r=-0,65$). La más alta correlación para LP fue con MO y arcilla ($r=0,36$; $r=0,35$) respectivamente. De los métodos indirectos utilizados en esta tesina, los de mayor coincidencia fueron los métodos Var der Merwes y Yilmaz, y se pudo comprobar que estos métodos fueron aplicables en los suelos de la Región. Los suelos estudiados que presentaron niveles más altos de expansividad fueron los provenientes de la provincia de Entre Ríos, donde se encuentran la mayor parte de los Vertisoles de la Argentina.

Palabras clave: índice plástico, regresión lineal, correlación, expansión, textura.

ABSTRACT

Development of a predictive model for the Atterberg limits in soils of the Pampas Region with different percentage of clay and organic matter content and the evaluation of expansivity by indirect methods.

Soil is an essential factor in the implementation of civil engineering construction. Each region has different characteristics and natural properties of soils, so they must be evaluated. One of the tests to determine these properties is the Atterberg limits. The objective of this work was to develop a predictive model for the Atterberg limits and the evaluation of expansiveness by indirect methods in soils of the Pampas Region. 43 superficial samples of pampas soils were taken. The following were analyzed: LL (liquid limit), LP (plastic limit), IP (plastic index), particle percentage (clay, silt, sand), OM (Organic Matter), CEC (Cation Exchange Capacity) and COLE (coefficient of linear extensibility). The statistical analyzes were PCA (Principal Component Analysis), linear regression and Pearson's correlation analysis. The variables that explained the predictive model for LL were clay and MO with a linear fit of 74% and for LP it was LL with a polynomial fit of 69%. A high correlation ($r = 0.79$) was found between LL and clay; and a negative correlation with sand ($r = -0.65$). The highest correlation for LP was with OM and clay ($r = 0.36$; $r = 0.35$) respectively. Of the indirect methods used in this thesis, the ones with the greatest coincidence were the Var der Merwes and Yilmaz methods, and it was found that these methods were applicable in the soils of the Region. The soils studied that presented the highest levels of expansiveness were those from the province of Entre Ríos, where most of the Vertisols of Argentina are found.

Keywords: plastic index, linear regression, correlation, expansion, texture.

Índice

1.	Introducción.....	1
1.1.	Planteamiento del problema.....	5
1.2.	Objetivos.....	6
1.2.1.	Objetivo general.....	6
1.2.2.	Objetivos específicos.....	6
1.3.	Justificación.....	7
1.4.	Delimitaciones.....	7
1.4.1.	Contenido.....	7
1.4.2.	Ensayos.....	7
1.4.3.	Alcance.....	8
1.5.	Organización del documento.....	8
2.	Marco teórico.....	8
2.1.	Antecedentes.....	8
2.2.	Análisis mecánico del suelo.....	9
2.2.1.	Consistencia del suelo.....	9
2.2.2.	Carta de plasticidad.....	11
2.2.3.	Clasificación del Suelo.....	12
2.2.4.	Expansividad del suelo.....	14
2.3.	Textura del suelo.....	14
2.3.1.	Método del densímetro de Bouyoucos.....	17
2.4.	Materia orgánica del suelo.....	18
2.4.1.	Método de Walkley y Black.....	18
2.5.	Análisis de regresión simple y múltiple.....	19
2.5.1.	Modelo de regresión lineal simple.....	20
2.5.2.	Modelo de Regresión Lineal Múltiple.....	24
2.6.	Metodología del trabajo.....	26
2.6.1.	Tipo de estudio.....	26
2.6.2.	Fuentes de información.....	26
2.6.3.	Diseño metodológico.....	26
3.	Análisis del problema.....	28
3.1.	Descripción de la situación actual.....	28
4.	Solución del problema.....	28
4.1.	Solución propuesta.....	28
5.	Desarrollo documental.....	28
5.1.	Área de estudio.....	28

5.2.	Geología de la Región Pampeana	29
5.3.	Procedimiento y equipo utilizado	30
5.3.1.	Límites de Atterberg	30
5.3.2.	Expansividad del suelo	33
5.3.3.	Determinación del CIC	36
5.3.4.	Determinación del porcentaje de partícula	36
5.3.5.	Materia orgánica del suelo	37
5.3.6.	Modelos predictivos	39
6.	Resultados y discusión	40
6.1.	Desarrollo de un modelo predictivo para los límites de Atterberg (límite líquido y límite plástico) para suelos con diferente porcentaje de arcilla y contenido de materia orgánica en suelos de la Región Pampeana y la evaluación de la expansividad por métodos indirectos.	40
6.1.1.	Modelo predictivo para el límite líquido (LL)	41
6.1.2.	Modelo predictivo para el límite plástico (LP)	42
6.2.	Evaluación de la expansividad con diferentes métodos indirectos	44
6.3.	Resultados para los objetivos específicos.	47
6.3.1.	Análisis del modelo de mayor poder predictivo para los límites de Atterberg (LL y LP)	47
6.3.2.	Comparación de los modelos predictivos con otras investigaciones realizadas en la Región.	48
6.3.3.	Relación del método COLE con todas las variables estudiadas	49
7.	Conclusiones	51
7.1.	Recomendaciones	52
7.2.	Líneas futuras de investigación	52
8.	Glosario de términos especializados	52
9.	Bibliografía	54
10.	Anexos	60
10.1.	Anexo 1: Límites de Atterberg y porcentaje de partícula de los suelos estudiados.	60
10.2.	Anexo 2: Valores de CIC y COLE en los suelos estudiados.	61
10.3.	Anexo 3: Clasificación de la expansividad con los métodos indirectos	62

Índice de tablas

Tabla 1. Clasificación de la expansividad propuesto por Yilmaz (2004).....	34
Tabla 2. Clasificación de la expansividad propuesto por Dakshanamany y Raman (1973).....	34
Tabla 3. Clasificación de la expansividad propuesto por Chen (1988).....	35
Tabla 4. Matriz de correlación entre las variables edáficas y los límites de Atterberg .	40
Tabla 5. Coeficientes de regresión y estadísticos asociados para el LL.	41
Tabla 6. Coeficientes de regresión y estadísticos asociados para el LP.....	42
Tabla 7. Matriz de correlación y coeficientes asociados del COLE con las variables estudiadas.	49
Tabla 8. Límites de Atterberg y porcentaje de partícula de los suelos estudiados.....	60
Tabla 9. Valores de CIC y COLE en los suelos estudiados.	61
Tabla 10. Clasificación de la expansividad con son los métodos indirectos utilizados.	62

Índice de fórmulas

Ecuación 1. Línea A dentro de la carta de plasticidad de Casagrande.	12
Ecuación 2. Línea U dentro de la carta de plasticidad de Casagrande.	12
Ecuación 3. Porcentaje de la suspensión a una determinada lectura	17
Ecuación 4. Ecuación de la recta como modelo de regresión lineal.	20
Ecuación 5. Modelo de regresión lineal simple.	21
Ecuación 6. Diferencia entre los datos observados y estimados en el método de MCO.	21
Ecuación 7. Error estándar de estimación en el modelo de regresión lineal simple.	22
Ecuación 8. Suma de cuadrados total.....	23
Ecuación 9. Suma de cuadrados de la regresión	23
Ecuación 10. Suma del cuadrado del error.	23
Ecuación 11. Modelo de regresión lineal múltiple.....	24
Ecuación 12. Modelo de regresión lineal múltiple estimado.....	24
Ecuación 13. Error estándar de estimación en el modelo de regresión lineal múltiple. 25	
Ecuación 14. Coeficiente de determinación múltiple (Webster, 2000).....	25
Ecuación 16. Índice de plasticidad.....	33
Ecuación 17. Fórmula para la determinación del COLE	33
Ecuación 18. Fórmula para el porcentaje de carbono orgánico.....	38
Ecuación 19. Fórmula para el porcentaje de materia orgánica.....	39
Ecuación 20. Modelo predictivo para el LL en suelos de la Región Pampeana.....	42
Ecuación 21. Modelo predictivo para el LP en suelos de la Región Pampeana	43

Índice de figuras

Figura 2.1. Límites de consistencia del suelo. (Adaptado de Das, 2001).	10
Figura 2.2 Carta de plasticidad de Casagrande (Adaptado de Das, 2001).	12
Figura 2.3. Diagrama de la clase textural (Adaptado de USDA, 1999).	16
Figura 2.4. Diagramas de dispersión y su correspondiente ajuste por regresión (Adaptado de Webster,2000).	20
Figura 2.5. Análisis de correlación entre variables (Adaptado de Webster,2000)	22
Figura 5.1 Localización de los sitios de muestreo de suelos en la Región Pampeana.	29
Figura 5.2. Ensayo de límite líquido (Fuente: el autor).	31
Figura 5.3. Ensayo de límite plástico (Fuente: el autor).....	32
Figura 6.1. Gráfico de tendencia del modelo predictivo para el LP en suelos de la Región Pampeana.....	43
Figura 6.2. Niveles de expansividad por diferentes métodos analíticos en suelos de la Región Pampeana.....	44
Figura 6.3. Relación entre el LL y CIC propuesta por Yilmaz (2004).	45
Figura 6.4. Niveles de expansividad por el modelo Van der Merwes (1964) en suelos de la Región Pampeana.	46
Figura 6.5. Relación entre los valores estimados y observados para LL y LP en suelos de la Región Pampeana.	47
Figura 6.6. Comparación entre los modelos predictivos y otros resultados para los límites líquido y plástico de la Región Pampeana.	48
Figura 6.7. Análisis de componentes principales de los niveles de expansión contracción propuesto por Thomas et al. (2000).	50

1. Introducción

El suelo es la capa que sirve de soporte a las obras civiles y la cual influye en la naturaleza de las fundaciones. Toda obra civil sea esta un edificio, un puente, un pavimento, transmite su carga finalmente sobre el suelo. Los límites de Atterberg son propiedades esenciales para la identificación de los suelos finos, tal y como fue establecido a comienzos del siglo XX por el ingeniero químico Albert Atterberg (Alvarado y Baquero, 2011). Para propósito de la ingeniería, el suelo se define como el agregado no cementado de granos minerales y materia orgánica descompuesta (partículas sólidas) con líquido y gas en los espacios vacíos entre las partículas sólidas (Das, 2015).

Un modelo matemático es la representación simplificada de un sistema, donde se describen las variables dependientes e independientes de interés, características y restricciones mediante símbolos, diagramas y ecuaciones. Pueden ser descriptivos o de simulación, en los primeros únicamente se representan los componentes del sistema, mientras que en los segundos se imita el funcionamiento del sistema y se obtienen resultados predictivos, en forma de datos numéricos o gráficos. Así, un modelo puede describirse como una representación simplificada de un sistema real, y es en esencia, una descripción de entidades y la relación entre ellas (García, 2008).

Los modelos matemáticos, al igual que cualquier herramienta empleada para procesar información, tienen como objetivos el mejorar el entendimiento sobre los sistemas en estudio para probar teorías científicas, predecir el resultado de una combinación de situaciones en el sistema, o controlar el sistema estudiado y producir resultados anticipados (Ortega et al., 1999). También proporcionan una herramienta para evaluar los sistemas de producción más completa y adaptable a diferentes condiciones, por integrar todos los procesos como variables (Rotz et al., 2005). Por lo que es importante validar el modelo, es decir, comprobar que tenga la capacidad de representar adecuadamente a los componentes e interacciones del sistema real (Orestes et al., 1994).

El suelo se utiliza como material de construcción en diversos proyectos de ingeniería civil y con cimientos estructurales. La mayoría de las estructuras diseñadas por el hombre se apoyan sobre el suelo, por tal razón el estudio de éste y sus características es de principal importancia en el diseño, desarrollo y desempeño de una estructura (Das, 2015).

Una parte importante del estudio del suelo son los ensayos de laboratorio, entre los cuales se destacan los límites de Atterberg. Estos límites fueron definidos inicialmente por el químico sueco Albert Atterberg (1911) y posteriormente redefinidos por Arthur Casagrande (1932), quien desarrolló el método de percusión que se utiliza para medir el límite líquido, que surgió por la necesidad de establecer los puntos en los que la consistencia del suelo cambia de un estado a otro (García, 2013).

La consistencia del suelo es la manifestación de las fuerzas físicas de cohesión y adhesión que actúan dentro del mismo bajo varios estados de humedad, o sea, resistencia a la deformación o ruptura cuando se aplica una fuerza (García, 2013). La consistencia varía con la textura, materia orgánica, cantidad y naturaleza del material coloidal hasta cierto punto con la estructura y especialmente con el contenido de humedad (Moreno et al., 2014). De acuerdo con el contenido de humedad, el suelo presenta varios estados de consistencia, los cuales le dan ciertas propiedades especiales que definen su comportamiento mecánico (Hillel, 1998).

Según Montenegro y Malagón (1990), evaluar la consistencia de un suelo es establecer su resistencia a la penetración, su resistencia a la ruptura y determinar los contenidos de humedad que lo hacen cambiar de estado. Además, la evaluación de la expansibilidad que tenga el suelo. Las unidades más adecuadas para definir las resistencias a la penetración y a la ruptura son bar o kPa, aunque tradicionalmente se usan con frecuencia kg cm^{-2} y PSI.

Los límites de Atterberg están directamente relacionados con la cantidad de agua que contiene un material y/o que es capaz de absorber; en otras palabras, con el tanto por ciento de partículas con dimensiones coloidales presentes en el material y su tendencia a comportarse como verdadero coloide. Está claro que debe existir una relación estrecha entre los límites y las características físicas y tecnológicas de un determinado material. Existen varios factores que influyen directamente en estos límites, los cuales son definidos por Moreno et al. (2014) y Baver (1972) que se exponen a continuación:

- **Contenido de arcilla:** La plasticidad es una propiedad de los suelos finos, Atterberg (1911) mostró que incrementar el porcentaje de arcilla en una muestra de suelo incrementa también el límite líquido y el índice plástico. Caso contrario, al minimizar la cantidad de arcilla se disminuye el límite líquido y el índice plástico del suelo. Baver (1972) determinó que el índice plástico está relacionado con la cantidad de partículas de un suelo que tiene un tamaño menor a dos micrómetros.
- **Naturaleza del mineral arcilloso:** Originalmente Atterberg (1911) definió que solamente los minerales con estructuras laminares mostraban plasticidad, y que minerales como los cuarzos que muestran una estructura tetraédrica no son plásticos. Por lo que materiales como la caolinita, la montmorillonita y la biotita cuyos cristales están formados por hojas, también muestran propiedades plásticas, demostrando que el tipo de arcilla contenida en el suelo es un parámetro importante de la cantidad de agua que puede absorber.
- **Materia orgánica:** La presencia de materia orgánica en el suelo tiene un efecto importante en el límite plástico y líquido. En general los estratos superiores del suelo tienen una plasticidad mayor que los estratos más profundos, lo cual puede atribuirse al mayor contenido de material orgánico en la capa superior del suelo. La oxidación de la materia orgánica causa un descenso en ambos límites (Moreno et al., 2014).

Un suelo expansivo es aquel que es susceptible a sufrir cambios volumétricos con el cambio de humedad, es decir, se expanden cuando están húmedos y se contraen al secarse. Este fenómeno se produce principalmente por el contenido de minerales de arcilla (esmectitas y motmorillonitas). Las arcillas expansivas producen empujes verticales y horizontales afectando las cimentaciones, empujando muros y destruyendo pisos y tuberías enterradas. En las vías se presentan ascensos y descensos que afectan su funcionamiento. En general, el grado de expansividad se puede determinar en función de las propiedades geotécnicas de los suelos (Sowers y Sowers, 1994).

Los suelos loessicos de Argentina constituyen el principal depósito de su tipo en Sudamérica, cubriendo más de 600.000 km² de superficie, y distribuidos en función de los vientos predominantes de la región. Si los depósitos corresponden a loess primario o si han sufrido procesos que han alterado su estructura metaestable, ya que en función de ello cambiarán sus propiedades y comportamiento. A medida que los mismos son más antiguos, son más estables, siendo un problema menor para las obras civiles. Para caracterizar los suelos loessicos se puede recurrir a ensayos de campo o de laboratorio, siendo esta última opción la más adecuada (Rocca et al., 2006).

Por lo anteriormente expuesto, resulta muy útil poder identificar un suelo según su consistencia y comportamiento, de esta forma se puede predecir su capacidad portante frente a las cargas, sus propiedades de consolidación y compactación y sus posibles asentamientos y expansiones. Determinar el grado expansividad de un suelo, es una de las utilidades más importantes de los límites de Atterberg dentro de la mecánica de suelos (García, 2013). El objetivo de la presente tesis es obtener un modelo predictivo para cada uno de estos límites, mediante la realización de los ensayos de laboratorio pertinentes para cada una de las pruebas, incluyendo la expansividad por métodos indirectos, en los suelos muestreados de la Región Pampeana.

1.1. Planteamiento del problema.

Según Pérez et al. (2006), un modelo predictivo es un conjunto de ecuaciones que representa procesos, variables y relaciones entre variables de un fenómeno del mundo real y que proporciona indicios aproximados de su comportamiento bajo los diferentes manejos de sus variables. Atterberg y Casagrande destacaron la importancia de los materiales finos y de las arcillas en particular, pero no tomaron en cuenta a la materia orgánica la cual se encuentra en forma natural en los suelos. Por otra parte, no se ha encontrado ningún trabajo en la Región en el cual se planteó una ecuación predictiva para cada límite de Atterberg (líquido y plástico). A través de estos límites también se puede conocer la expansividad de los suelos, la cual es de mucha importancia para el ingeniero civil permitiéndole conocer el comportamiento mecánico de un suelo. Se estima que las pérdidas anuales a nivel mundial por daños en las construcciones sobre los suelos expansivos superan los dos billones de dólares (Patrone y Prefumo, 2005). Por lo anteriormente expuesto, una ecuación predictiva para cada límite de Atterberg sería una herramienta útil para el ingeniero civil y para otros profesionales que estudian el suelo ya que se podrá obtener de manera rápida y aproximada el valor predictivo para cada límite.

1.2. Objetivos.

1.2.1. Objetivo general

- Desarrollar un modelo predictivo para los límites de Atterberg en suelos de la Región Pampeana con diferente porcentaje de arcilla y contenido de materia orgánica y evaluar la expansividad por métodos indirectos.

1.2.2. Objetivos específicos

- Analizar el modelo de mayor poder predictivo para los límites de Atterberg (límite líquido y límite plástico).
- Comparar los modelos predictivos con otras investigaciones realizadas en la Región.
- Relacionar el método COLE con todas las variables estudiadas.

1.3. Justificación.

Un modelo predictivo debidamente evaluado y validado mejora la eficiencia en los procesos de investigación y transferencia de tecnología, al permitir extrapolar resultados a otras localidades con similares características y obtener posibles escenarios del funcionamiento del sistema con la innovación sugerida, lo que permite de cierta forma, hacer una evaluación antes de implementarla en el sistema real, esto es especialmente importante para hacer eficiente el uso y manejo de los recursos naturales, humanos y económicos. En el modelo predictivo a obtener, el porcentaje de arcilla, limo y arena, junto con el contenido de materia orgánica serán las variables predictoras. La materia orgánica ha sido poco estudiada en la influencia y la variación de los límites de consistencia y su posible relación con la expansividad del suelo. La presente tesina pretende profundizar en la investigación de las ciencias del suelo, aportando al conocimiento y a la vez brindar una herramienta útil para la ingeniería civil, la arquitectura, la agronomía, y la geología; tanto para profesionales, docentes, estudiantes e investigadores que estudian el suelo a través de la publicación y difusión de los resultados obtenidos en este trabajo a las instituciones que requieran esta información.

1.4. Delimitaciones.

1.4.1. Contenido.

Es necesario dejar claro que la limitación principal fue la variedad de materiales que se analizaron, donde fue obligatorio realizar un estudio más preciso para poder determinar si el modelo predictivo a implementar será útil en la construcción y en otras áreas de la ciencia del suelo.

1.4.2. Ensayos.

Aunque los resultados arrojados por el método de Atterberg son pertinentes, se genera un importante número de errores en la ejecución en el mismo, teniendo en cuenta que el margen de error varía en la experticia del operador, debido a esto se pretende implementar un método alternativo para la determinación de estos límites.

1.4.3. Alcance.

Estos estudios son netamente académicos donde se registran resultados y posibles sugerencias para el uso del método dentro de la normativa y los laboratorios que controlan los procesos de calidad de una obra. Este proyecto busca como resultado conocer y desarrollar un modelo predictivo nuevo y útil, no desarrollado aún en la Argentina y así determinar los límites de una manera más rápida y precisa.

1.5. Organización del documento.

La tesina contiene el Capítulo I, con la introducción general, planteamiento del problema, el objetivo general y específicos, justificación, delimitaciones y la organización de la tesina. En el Capítulo II, se presenta el marco teórico, los antecedentes generales, revisión de literatura y la metodología del trabajo. El Capítulo III, con el análisis del problema y la descripción de la situación actual. El Capítulo IV, con la solución del problema y la solución propuesta. El Capítulo V, con los materiales y métodos, la localización de los sitios de muestreo, la metodología empleada para cada determinación, ensayos de laboratorio y análisis estadístico. El Capítulo VI, se presentan los resultados y discusión de la tesina. Por último, el capítulo VII, con las conclusiones generales, donde se sintetiza la información presentada en el Capítulo VI (Resultados y discusión). Finalmente se presenta toda la bibliografía consultada y los anexos.

2. Marco teórico.

2.1. Antecedentes.

Desde hace mucho tiempo la ingeniería ha tratado de definir cuantitativamente, cuál era la propiedad fundamental y distintiva de los materiales arcillosos, fue el científico Atterberg el primero que dio una respuesta satisfactoria al problema. A él se debe el haber indicado que la plasticidad no se puede expresar con un solo valor numérico, sino que es una función de dos cantidades combinadas (Das, 2001). Indicó este valor como el contenido de agua del material cuando se encuentran en un estado de transición entre los diferentes estados de consistencia. Estos contenidos de agua son ahora llamados comúnmente como límites de Atterberg. Las investigaciones desarrolladas por A. Casagrande sobre la idea base de Atterberg han conducido a demostrar la

exactitud y a poner en claro la importancia de los límites para establecer las propiedades de todos los materiales finos, y de las arcillas en particular (Das, 2015).

La mecánica de suelos ha establecido unos parámetros de clasificación, los cuales permiten entender y determinar ciertos criterios constructivos respecto a la composición física del suelo, teniendo en cuenta que los métodos implementados en la ingeniería geotécnica son empíricos, estos requieren de un buen criterio y una buena metodología de aceptación. En los últimos años se han realizado numerosas investigaciones con la finalidad de establecer metodologías que le permitan al ingeniero civil implantar diagnósticos técnicos, para la construcción de obras civiles sobre suelos arcillosos, siguiendo las recomendaciones dadas por especialistas en geotecnia o laboratorios de control de calidad (Grønbech et al., 2011).

En Argentina se han realizado varios trabajos de investigación e informes técnicos aplicando los límites de Atterberg, entre los cuales se destacan: Perret (2015) que trabajó en suelos loésicos de la ciudad de Córdoba, para la caracterización geotécnica de los suelos presentes y un estudio del colegio de arquitectos de la provincia de Santa Fe realizado en el año 2014, que efectuó un informe geotécnico con el objetivo de determinar las propiedades físicas y mecánicas de los suelos de esta provincia, para lo cual también utilizaron los límites de Atterberg.

2.2. Análisis mecánico del suelo.

El análisis mecánico es la determinación del rango del tamaño de partículas presentes en un suelo, expresado como un porcentaje del peso seco total. Se usan generalmente dos métodos para encontrar la distribución del tamaño de las partículas del suelo: 1) análisis con cribado, para tamaños de partículas mayores de 0,075 mm de diámetro, y 2) análisis hidrométrico, para tamaños de partículas menores de 0,075 mm de diámetro. (Das, 2001).

2.2.1. Consistencia del suelo.

La determinación de la consistencia del suelo es uno de los métodos de prueba más aplicados en la mecánica del suelo (INCOTEC, 1999). Es una de las propiedades más notorias y difíciles de cuantificar en el suelo. La consistencia

se refiere al comportamiento de este ante fuerzas o perturbaciones externas que tienden a deformarlo. Las características de la deformación están sujetas a: 1) el tipo de suelo; 2) porcentaje de humedad; 3) la fuerza aplicada; 4) las condiciones físicas y 5) la forma en que se aplican las fuerzas. El principal factor que influye en la consistencia de un suelo es el contenido de agua, puesto que la mayoría de los suelos son suaves y cohesivos cuando están húmedos, siendo fácilmente deformables; pero cuando están secos pueden ser altamente resistentes a deformaciones y a fuerzas aplicadas (Warren, 1985). En la figura 2.1 se muestran los límites de consistencia del suelo de acuerdo con el grado de humedad.

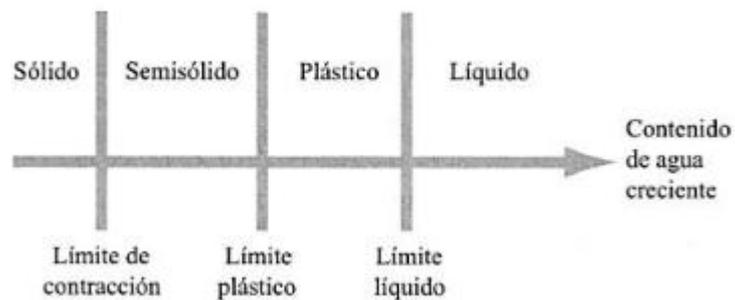


Figura 2.1. Límites de consistencia del suelo. (Adaptado de Das, 2001).

Entonces, dependiendo del contenido de agua el comportamiento del suelo presenta cuatro estados denominados: sólido, semisólido, plástico y líquido (figura 2.1). El porcentaje de humedad en el que el suelo pasa de estado sólido a semisólido se define como límite de contracción (SL). El contenido de agua en el punto de transición de estado semisólido a estado plástico es el límite plástico (LP); mientras que el límite líquido (LL) delimita el estado plástico y el estado líquido. A estos puntos se les conoce también como límites de Atterberg (Das, 2001).

- **Límite Líquido (LL):** De acuerdo con lo estipulado en el párrafo anterior, los suelos plásticos tienen en el límite líquido una resistencia muy pequeña al esfuerzo cortante, definida según Atterberg en 25 g/cm². Además, la cohesión es nula a partir del límite líquido (Crespo, 2004). Casagrande (1932) determinó en un dispositivo estándar (cuchara de

Casagrande) fabricado para estimar el límite líquido que cada golpe realizado por la máquina, se le retribuye una resistencia de aproximadamente 1 g/cm^2 ($0,1 \text{ kN/m}^2$). Por tanto, el límite líquido de un suelo de grano fino se da aproximadamente 25 golpes (2.5 kN/m^2).

- **Límite Plástico (LP):** Se define como el contenido de agua, con lo cual el suelo se moldea en rollitos de 3,2 mm de diámetro hasta que se rompen. El límite plástico es el límite inferior de la etapa plástica del suelo. La prueba es simple y se lleva a cabo enrollando repetidamente a mano sobre una placa de vidrio una masa de suelo de forma elipsoidal (Das, 2001; 2015).
- **Límite de Contracción (SL):** La masa del suelo se contrae conforme se pierde gradualmente el agua del suelo. Con una pérdida continua de agua, se alcanza una etapa de equilibrio en la que al aumentar la pérdida de agua conducirá a que no haya cambio de volumen. El contenido de agua, en porcentaje, por debajo del cual el cambio de volumen de la masa del suelo cesa, se define como el límite de contracción (Das, 2001; 2015).
- **Índice de Plasticidad (IP):** Es la diferencia numérica entre los límites líquidos y plásticos, y determina el rango de humedades dentro del cual el suelo se encuentra en estado plástico tal como lo definen los ensayos (Crespo, 2004).

2.2.2. Carta de plasticidad

Casagrande (citado en Das, 2001) estudió la relación entre el índice de plasticidad y el límite líquido de una gran variedad de suelos naturales y en base a los resultados obtenidos propuso una carta de plasticidad (figura 2.2); donde la característica más importante es la presencia de una línea A determinada en forma empírica (Ecuación 1). La línea formada por esta ecuación separa las arcillas inorgánicas de los limos inorgánicos. Por encima de la línea A se encuentran las arcillas inorgánicas; mientras que los limos inorgánicos se ubican por debajo de la línea. Tanto los limos inorgánicos como las arcillas orgánicas de compresibilidad media se encuentran en la misma región (debajo de la línea A y LL variando entre 30 y 50). Las arcillas orgánicas se ubican en la misma

región que los limos inorgánicos de alta compresibilidad (debajo la línea A y LL mayor a 50).

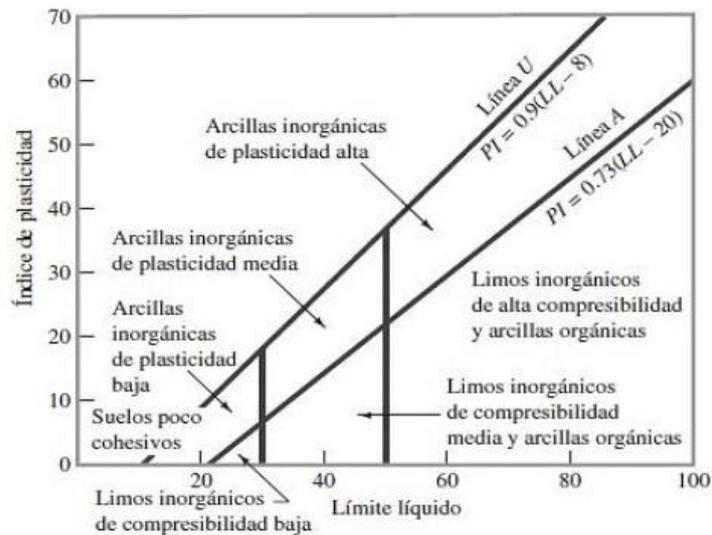


Figura 2.2 Carta de plasticidad de Casagrande (Adaptado de Das, 2001).

La carta de plasticidad es la base para la clasificación de suelos finos dentro del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (Das, 2001).

$$PI = 0,73(LL - 20)$$

Ecuación 1. Línea A dentro de la carta de plasticidad de Casagrande.

En la figura 2.2 también se observa la línea U por encima de la línea A, la cual representa de forma aproximada el límite superior de la relación del límite líquido e índice de plasticidad para cualquier suelo encontrado hasta ahora. U se define por:

$$PI = 0,9(LL - 8)$$

Ecuación 2. Línea U dentro de la carta de plasticidad de Casagrande.

2.2.3. Clasificación del Suelo

El límite líquido propuesto por Atterberg y mejorado por Casagrande ha sido usado ampliamente en la clasificación de suelos (Das, 2015). Debido a la gran variedad de suelos en la naturaleza, la Mecánica de Suelos ha desarrollado

sistemas de clasificación en donde cada uno tiene un amplio campo de aplicación, dependiendo del uso y necesidades que los haya fundamentado. Es así, que según el tamaño de las partículas que conforman el suelo se tiene: el sistema de clasificación de la Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes (AASHTO), la clasificación de la Administración de Aeronáutica Civil (CAA), el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), entre los más empleados. Hoy en día el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos es el más aceptado, puesto que es el que mejor satisface las exigencias de la mecánica de suelos (Crespo, 2004).

2.2.3.1. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)

De acuerdo con Das (2001; 2015), el sistema unificado de clasificación de suelos separa los suelos en dos grupos:

- a) Suelos de grano grueso: son de cualidades tipo grava y arenosa, donde menos del 50% pasa por el tamiz N° 200. Los símbolos de grupo son: G para un suelo tipo grava o un suelo gravoso, y S para un suelo tipo arena o un suelo arenoso.
- b) Suelos de grano fino: son suelos en el cual el 50% o más pasan el tamiz N°200. Los símbolos de grupo son: M para un suelo del tipo limo inorgánico, C para un suelo del tipo arcilla inorgánica y O para suelos limos y arcillas orgánicas.

Además, pueden estar acompañados de otros símbolos:

- W: bien graduado.
- P: mal graduado.
- L: baja plasticidad (límite líquido menor que 50).
- H: alta plasticidad (límite líquido mayor que 50).

Para una correcta clasificación se debe conocer la siguiente información:

- Porcentaje de grava, es decir, la fracción que pasa la malla de 76,2 mm y es retenida en la malla No°4 (abertura de 4,75 mm).
- Porcentaje de arena, es decir, la fracción que pasa la malla N°4 (abertura de 4,75 mm) y es retenida en la malla N° 200 (abertura de 0,075 mm).

- Porcentaje de limo y arcilla, es decir, la fracción de finos que pasan la malla No°200
- (abertura de 0,075 mm).
- Coeficiente de uniformidad (Cu) y coeficiente de curvatura (Cc).
- Límite líquido e índice de plasticidad de la porción de suelo que pasa la malla No°40.

En base a estas cifras y por medio de la norma ASTM D2487 se obtiene la clasificación del suelo, definida por el nombre y símbolo de grupo correspondiente.

2.2.4. Expansividad del suelo

La expansividad del suelo se produce por el cambio de volumen en relación con los cambios en su contenido de agua. Existen dos propiedades características que son el potencial expansivo y de contracción, mientras mayor sea el contenido de arcilla de los suelos mayor será el potencial expansivo que presente. Uno de los casos que se puede evidenciar es un suelo con alta presencia de montmorillonita que al entrar en contacto con agua tendrá un comportamiento de hinchamiento y contracción mayor a otros suelos (Patrone y Prefumo, 2005). La expansión y compresión del suelo en los ciclos de humedecimiento y secado pueden causar daños apreciables en las estructuras que se construyan sobre aquél; en especial las zapatas y las losas poco profundas susceptibles a esos cambios. La magnitud de las expansiones depende de las cargas actuantes sobre el suelo y es obvio que aquellas serán mayores cuantas menores sean éstas. Por lo general, los levantamientos debidos a expansiones son causa de problemas más serios que los asentamientos convencionales, debido a que son más difíciles de corregir una vez que han ocurrido. Por lo tanto, resulta importante identificar la expansividad del suelo con anticipación para evitar pérdidas económicas y daños estructurales (Badillo y Rodríguez, 2006).

2.3. Textura del suelo

Se define la textura del suelo como la proporción (en porcentaje de peso) de las partículas menores a 2 mm de diámetro (arena, arcilla y limo) existentes en los horizontes del suelo. En edafología las partículas de un suelo se clasifican en

elementos gruesos (tamaño de diámetro superior a 2 mm) y elementos finos (tamaño inferior a 2 mm). Estos últimos son los utilizados para definir la textura de un suelo. (Porta et al., 2003). Siguiendo la terminología establecida por la USDA (1999), tenemos las siguientes clases de partículas inferiores a 2 mm de diámetro (\emptyset):

- Arena muy gruesa: 2 mm - 1 mm
- Arena gruesa: 1 mm – 0,5 mm
- Arena media 0,5 mm – 0,25 mm
- Arena fina 0,25 mm – 0,10 mm
- Arena muy fina 0,10 mm – 0,05 mm
- Limo 0,05 mm – 0,002 mm
- Arcilla < 0,002 mm

La textura del suelo varía de unos horizontes a otros, siendo una característica propia de cada uno de ellos por lo que es tan importante el análisis de los diferentes horizontes del suelo (FAO, 1999). Para su determinación exacta se usan métodos oficiales de análisis, como es el caso del método del densímetro de Bouyoucos (fase de laboratorio), también se puede realizar de forma indirecta en campo (fase de descripción de perfil), aunque este método es menos preciso (Porta et al., 2003). La finalidad de ambos métodos es obtener la clase textural del horizonte, la cual se obtiene mediante los porcentajes de cada una de las clases de partículas conocidas recurriendo luego al diagrama triangular de la USDA para saber su clasificación textural.

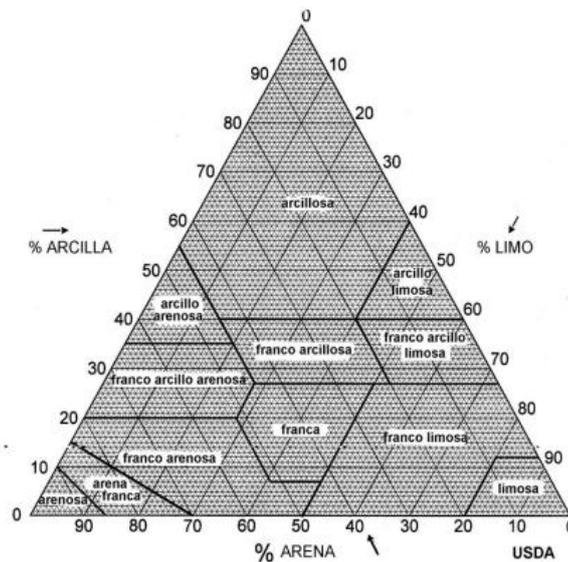


Figura 2.3. Diagrama de la clase textural (Adaptado de USDA, 1999).

Según USDA (1999), todas estas clases texturales se agrupan en 4 grandes grupos que poseen características similares:

- **Las texturas arcillosas** dan suelos plásticos y difíciles de trabajar. Retienen gran cantidad de agua y de nutrientes debido a la microporosidad y a su elevada capacidad de intercambio catiónico. Aunque retengan agua en cantidad presentan una permeabilidad baja, salvo que estén bien estructurados y formen un buen sistema de grietas.
- **La textura arenosa** es la contrapuesta a la arcillosa, pues cuando en superficie hay una textura arenosa los suelos se conocen como ligeros, dada su escasa plasticidad y facilidad de trabajo. Presentan una excelente aireación debido a que las partículas dominantes de gran tamaño facilitan la penetración del aire. Únicamente cuando se producen lluvias intensas se puede producir encharcamiento o escorrentía, momento en el que la erosión laminar es muy importante. La acumulación de materia orgánica es mínima y el lavado de los elementos minerales es elevado.
- **La textura limosa** presenta carencia de propiedades coloidales formadoras de estructura, formando suelos que se apelmazan con facilidad impidiendo la aireación y la circulación del agua. Es fácil la

formación de costras superficiales que impiden la emergencia de las plántulas.

- **Las texturas francas** o equilibradas al tener un mayor equilibrio entre sus componentes gozan de los efectos favorables de las anteriores sin sufrir sus defectos, el estado ideal sería la textura franca y a medida que nos desviamos de ella se van mostrando los inconvenientes derivados de una mayor presencia de algunos de los restantes tamaños de partículas.

2.3.1. Método del densímetro de Bouyoucos

Para cuantificar las fracciones texturales existen varios métodos, en general basados en la ley de Stocks. De estos uno de los más conocidos es el del hidrómetro de Bouyoucos (1962). Las distintas fracciones texturales se determinan usando variaciones del método del hidrómetro de Bouyoucos que mide el contenido de arcilla, limo y arena. A la muestra se le hace una dispersión química con hexametáfosfato de sodio, y una física en una batidora especial (Cosentino y Fernández, 1996). Se coloca luego la suspensión en una probeta de 1 litro, se enrasa y se introduce el hidrómetro. Se lee en la escala el valor medido, a distintos tiempos de acuerdo con ley de Stocks y luego se hacen los cálculos para determinar los porcentajes de las distintas fracciones.

Las mediciones hidrométricas se realizan:

- a) 1º lectura: a los 40 segundos luego de haber terminado la agitación.
- b) 2º lectura: a las 2 horas luego de haber terminado la agitación.

Expresión de los resultados:

$$C(\%) = \frac{R + (0,36x(20 - T)) - RL + (0,36x(20 - T))}{\text{Peso de la muestra}} * 100$$

Ecuación 3. Porcentaje de la suspensión a una determinada lectura

C (%): porcentaje de la suspensión a una lectura dada.

R: lectura del hidrómetro en cada momento escogido.

RL: lectura del blanco.

T: temperatura.

0,36: factor (divisiones del hidrómetro)

Por cada grado centígrado se aplica una corrección de 0,36 divisiones del hidrómetro. Por encima de 20 °C se suma y por debajo de 20 °C se resta (Bouyoucos, 1962; Gee y Baudeer, 1986).

2.4. Materia orgánica del suelo

La materia orgánica tiene un efecto positivo en la estructura del suelo, ya que es un componente cementante que permite mantener unidas las partículas primarias del suelo (arena, limo y arcilla), en conglomerados de mayor tamaño, que al unirse dejan poros entre ellos, los que sirven de sitios donde la materia orgánica queda ocluida y los microorganismos del suelo encuentran su hábitat. Esa red de poros interconectados además permite retener agua en cantidades suficientes y con apropiado potencial de energía (Graetz, 1997; Céspedes et al., 2005). Debido a la dificultad de estimar directamente el contenido de MOS (materia orgánica del suelo) resulta mucho más conveniente expresarla a través de su contenido de carbono orgánico (Carreira, 2005).

Con más de 70 años de vigencia, el método sugerido por Allan Walkley y Armstrong Black es el método más difundido y utilizado en los laboratorios de análisis de suelo. A pesar de no ser demasiado exacto, se ajusta perfectamente a los trabajos de rutina donde se requieren rapidez y alta capacidad de procesamiento de muestras (Carreira, 2005). Por otra parte, la medida obtenida de carbono oxidable tiene una interpretación directa por sí misma, como el contenido de materia orgánica activa en el suelo (Jackson, 1982).

2.4.1. Método de Walkley y Black

Este método consiste en someter una cantidad de suelo seco y tamizado a la acción oxidante del dicromato de potasio en medio de ácido sulfúrico. La titulación se realiza con sulfato amónico ferroso (Sal de Mohr) valorado y por diferencia entre el blanco y la muestra, se calcula el carbono orgánico expresado en porcentaje. Dado que con este método se determina el carbono orgánico, Walkley y Black (1934) encontraron que el porcentaje de carbono recuperado promediaba el 76%. Entonces propusieron el factor de 1,38 para expresar los

resultados en porcentaje de carbono orgánico total (COT). Finalmente, el porcentaje de MOS se obtiene multiplicando el COT por el factor 1,72.

2.5. Análisis de regresión simple y múltiple

Muchas de las investigaciones académicas pretenden buscar y establecer relaciones entre dos o más variables, con el objetivo de efectuar pronósticos que permitan tomar decisiones, en base a datos y cifras conocidas. El método estadístico que se utiliza para este propósito se conoce como análisis de regresión; que, además de permitir establecer la relación funcional o ecuación matemática entre las variables, proporciona la fuerza de esa relación. El análisis de regresión entre dos variables se define como regresión simple, mientras que el caso de un estudio entre más de dos variables se define como regresión múltiple. Se definen además dos tipos de variables: la variable dependiente que es la que se va a pronosticar, y la o las variables independientes que son utilizadas para predecir la variable dependiente (Colin et al., 1997; Cardona et al., 2013; Di Rienzo et al., 2018).

Debido a que el conjunto de datos a ser analizados puede presentar distintos diagramas de dispersión (disposición de los datos con respecto al sistema de ejes), es necesario conceptualizar entre regresión lineal y regresión curvilínea. La regresión lineal es aquella en que los datos se ajustan por medio de una línea recta, es decir que a medida que la variable independiente cambia, la variable dependiente varía en una cantidad constante.

La regresión curvilínea emplea una curva para expresar la relación entre variables; por lo que, a medida que la variable independiente cambia, la variable dependiente varía en una medida diferente (Figura 2.4). Si el conjunto de datos no expresa ningún patrón de análisis, no es posible establecer una relación entre variables (Webster, 2000).

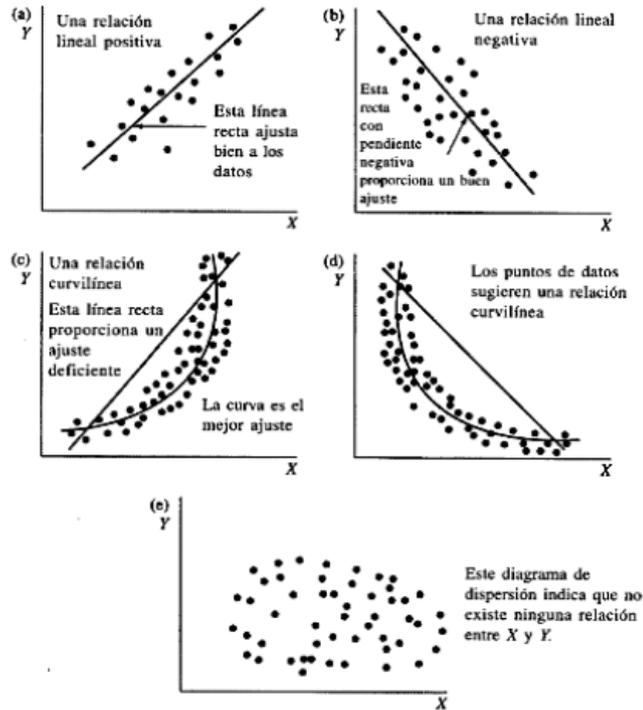


Figura 2.4. Diagramas de dispersión y su correspondiente ajuste por regresión (Adaptado de Webster,2000).

2.5.1. Modelo de regresión lineal simple

El modelo de regresión lineal simple se expresa en un sistema de ejes (x , y) por medio de una línea recta que busca ubicarse justo en medio de todos los puntos que conforman el diagrama de dispersión; donde la variable dependiente (y) está condicionada por la variable independiente (x). Donde a es la ordenada del modelo de regresión, ya que cruza el eje y en tal punto (intercepto); mientras que b es la pendiente de la recta que representa la razón de cambio entre las variables (Colin et al., 1997; Webster, 2000).

$$y = a + bx$$

Ecuación 4. Ecuación de la recta como modelo de regresión lineal.

Los valores de a y b son constantes, puesto que, para cualquier recta dada, sus valores no cambian. La configuración entre variables puede ser determinística o estocástica. La relación determinística es aquella que expresa de forma exacta el vínculo existente entre las variables. La relación estocástica debido a la presencia de variación aleatoria (en la mayoría de los casos),

presenta algún tipo de error al describir la relación entre las variables. Por tanto, dentro de este contexto el modelo de regresión lineal simple se puede expresar como:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \epsilon$$

Ecuación 5. Modelo de regresión lineal simple.

La ecuación 5 representa de forma objetiva la relación por la cual se hace regresión de y sobre x . La porción $B_0 + B_1x$ es la parte determinística de la relación, mientras que ϵ es la variación aleatoria de la variable dependiente, y por tanto el error en la ecuación (Colin et al., 1997; Webster, 2000).

2.5.1.1. Mínimos Cuadrados Ordinarios y la Recta de Mejor Ajuste

El objetivo del análisis de un problema por regresión es encontrar la mejor relación entre los datos muestrales, para ello el procedimiento matemático para hallar esta correspondencia se denomina mínimos cuadrados ordinarios (MCO). Este método determina una recta que se ubica en medio de los datos muestrales, a una distancia tal que se aproxima a todos los puntos de datos más que cualquier otra recta.

$$(y - y') = error$$

Ecuación 6. Diferencia entre los datos observados y estimados en el método de MCO.

La línea estimada de regresión lineal es la de mejor ajuste, ya que la diferencia entre los datos observados (y) y los datos estimados (y') es mínima, siendo esta diferencia el error existente dentro del análisis (Di Rienzo et al., 2018).

2.5.1.2. El Error Estándar de Estimación

Es un valor que estima el grado de distribución de los valores observados en torno a la recta de regresión. Manifiesta el comportamiento de estos valores de alejarse o acercarse a los valores reales de y en el modelo de regresión con propósito predictivo. La ecuación 7 determina el error estándar de estimación, en donde el numerador representa la diferencia entre los valores reales y los valores estimados de y (Webster, 2000).

$$Se = \sqrt{\frac{\Sigma(y - \hat{y})^2}{n - 2}}$$

Ecuación 7. Error estándar de estimación en el modelo de regresión lineal simple.

2.5.1.3. Análisis de la relación y el Coeficiente de Correlación

Una idea objetiva de la fuerza de relación entre los datos estudiados se lo obtiene a través del coeficiente de correlación o coeficiente de correlación producto – momento de Pearson (R), el cual puede tomar valores comprendidos entre -1 y +1. Cuando el valor de R es -1 la relación es negativa perfecta entre x y y , figura 2.5 (a). Si el valor de R es +1 la relación es positiva perfecta entre x y y , figura 2.5 (b). Se ha dicho antes que relación entre variables por lo general es variable con respecto a la recta de regresión, por lo que la correspondencia entre variables puede ser fuerte pero menos perfecta, figura 2.5 (c) y figura 2.5 (d); así como puede ser muy poca o nula la relación entre variables, figura 2.5 (e). Mientras mayor sea el valor de R en términos absolutos, más fuerte es la correlación entre las variables x y y (Colin et al., 1997; Webster, 2000).

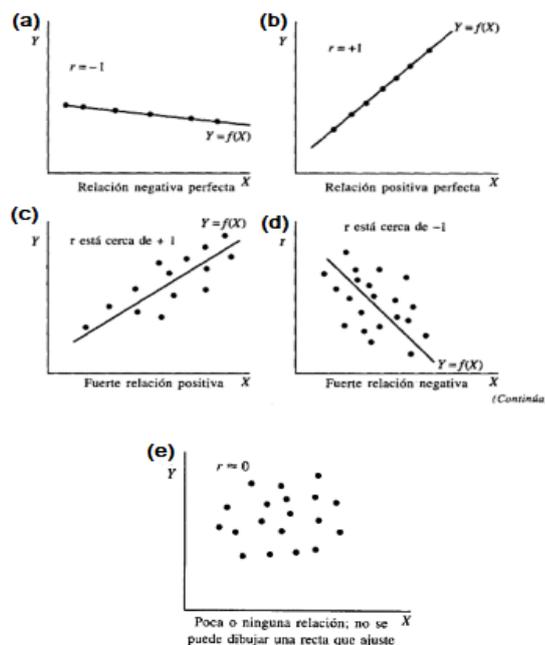


Figura 2.5. Análisis de correlación entre variables (Adaptado de Webster, 2000)

Según Webster (2000), para determinar el coeficiente de correlación y el coeficiente de determinación, se deben analizar tres valores de desviación:

La desviación total: es la cantidad determinada por la variación del valor medido de y con respecto a la media y_m . La adición de todos estos valores al cuadrado entrega la suma de cuadrados total (SCT).

$$SCT = \sum(y_i - y_m)^2$$

Ecuación 8. Suma de cuadrados total

La desviación explicada: representa la diferencia entre lo que determina el modelo de regresión y' y la media y_m . La adición de todos estos valores al cuadrado entrega la suma de cuadrados de la regresión (SCR).

$$SCR = \sum(y' - y_m)^2$$

Ecuación 9. Suma de cuadrados de la regresión

La desviación no explicada: es el error producto de la diferencia entre el valor medido de y y el valor estimado y' . La adición de todos estos valores al cuadrado entrega la suma al cuadrado del error (SCE).

$$SCE = \sum(y_i - y')^2$$

Ecuación 10. Suma del cuadrado del error.

Si bien es cierto, al ser el modelo de regresión una técnica confiable en la toma de decisiones dentro del campo de la ingeniería, temas económicos y hasta de negocios, éste no define relaciones de causa – efecto; es decir que la relación no implica casualidad. Así también, se debe tener mayor atención y cuidado de no pronosticar los valores de y utilizando valores de x que se encuentren fuera del rango de análisis, ya que dichos datos no forman parte de la regresión y se desconoce el tipo de relación que forman fuera de esta condición. No obstante; otra falla común dentro de este entorno es encontrar algún tipo de correlación entre variables que por lógica no guardan ningún tipo de relación. Por tanto, se debe tener especial cuidado al momento de tratar y examinar las variables de la regresión (Colin et al., 1997; Webster, 2000).

2.5.2. Modelo de Regresión Lineal Múltiple

El modelo de regresión lineal múltiple a diferencia del modelo de regresión lineal simple integra dos o más variables independientes para obtener una correlación entre variables y poder predecir el valor de la variable dependiente (Di Rienzo et al., 2018). El modelo de regresión lineal múltiple con n variables se expresa como:

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \dots + \beta_nx_n + \epsilon$$

Ecuación 11. Modelo de regresión lineal múltiple.

Donde los términos B_n son los coeficientes de la regresión y ϵ es el error por variación aleatoria de la variable dependiente. Al igual que en la regresión lineal simple se estima el valor de y , teniéndose:

$$y' = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n + \epsilon$$

Ecuación 12. Modelo de regresión lineal múltiple estimado.

En donde y' es el valor estimado de la regresión y b_n representa los coeficientes estimados de ajuste, es decir b_n es la cantidad por la cual, y' cambiará si x_n varía en una unidad, manteniendo constantes las otras variables independientes (Di Rienzo et al., 2018). Dentro de la regresión lineal múltiple, es necesario que se cumplan dos requisitos:

- a) El número de datos u observaciones n debe ser mayor al número de variables independientes en mínimo 2 unidades. En el modelo de regresión lineal múltiple hay $n + 1$ coeficientes por estimar para las variables independientes, por lo que los grados de libertad relacionados al modelo son $g. l. = n - (k + 1)$.
- b) La relación entre las variables independientes no debe ser linealmente relacionada; ya que se genera un problema de multicolinealidad, en donde los signos algebraicos de los coeficientes pueden llegar a ser opuestos, generándose un incremento en el error estándar de los coeficientes.

2.5.2.1. El Error Estándar de Estimación

De la misma forma que en la regresión lineal simple, el error estándar de estimación es un valor que estima el grado de dispersión de los valores

observados con respecto al modelo de regresión (plano de regresión). Si la dispersión entre los valores es poca, el error estándar de estimación es menor y por lo tanto el modelo de regresión es más conciso en el pronóstico. El error estándar de estimación dentro del modelo de regresión lineal múltiple se manifiesta:

$$Se = \sqrt{\frac{\sum(y - y')^2}{n - k - 1}}$$

Ecuación 13. Error estándar de estimación en el modelo de regresión lineal múltiple.

Donde n es el número de datos u observaciones y k representa el número de variables independientes. El numerador de la ecuación es la diferencia entre los valores reales y estimados de y (Webster, 2000).

2.5.2.2. Coeficiente de Determinación Múltiple

Este coeficiente da a conocer la fuerza con la que se relaciona y y las variables independientes dentro del modelo de regresión lineal múltiple. Para ello, la relación de la variación expresada con la variación total, al igual que en la regresión lineal simple, entendiendo como variación el cambio de los valores observados de y y la media y_m , mide la porción total de cambio de y en base a las variables independientes. La variación en y estaría expresada por la suma de los cuadrados de la regresión (SCR); mientras que la variación total en y se establecería por la suma total de cuadrados (SCT), como se ve:

$$R^2 = \frac{SCR}{SCT}$$

Ecuación 14. Coeficiente de determinación múltiple (Webster, 2000).

Es una práctica común en regresión múltiple reportar el coeficiente de determinación corregido R^2 , estadístico que se ajusta a la medida del poder explicativo para el número de grados de libertad (Colin et al., 1997).

2.6. Metodología del trabajo

2.6.1. Tipo de estudio

El objetivo de esta tesis es el desarrollo de un modelo predictivo para los límites de Atterberg en suelos con diferente porcentaje de arcilla y contenido de materia orgánica en la Región Pampeana y la determinación de la expansividad por métodos indirectos. Para ello, se realizará una ecuación predictiva teniendo como referencia los valores de los límites de Atterberg encontrados en los ensayos de laboratorio. Logrando de esta forma obtener los valores observados de los suelos estudiados y con ellos determinar los valores estimados del modelo para cada uno de estos límites y estudiar las variables explicativas que conformen estos modelos. Para la expansividad del suelo se aplicarán seis métodos indirectos encontrados en la literatura científica.

2.6.2. Fuentes de información

Los resultados registrados en esta tesina son propios a los ensayos realizados en el laboratorio de Manejo y Conservación de Suelos de la Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires (FAUBA), siguiendo todas las normas y protocolos utilizados en los trabajos de investigación. Las principales fuentes de información fueron investigaciones realizadas por universidades y otras instituciones nacionales y extranjeras, libros que estudian la mecánica de los suelos y artículos de investigación que muestran el interés en obtener un método adicional para la determinación de los límites de consistencia y expansividad.

2.6.3. Diseño metodológico

Para la ejecución del proyecto de investigación, se manejó una metodología teórico-práctica, donde inicialmente se realizó una inversión de tiempo para la revisión de la información existente, lo que permitió establecer las pautas de trabajo y cronograma a ejecutar. Siguiendo las necesidades que se presentaron para el proyecto de grado, se desarrollaron cuatro fases donde se agruparon las partes más relevantes de la investigación de la siguiente manera:

- Fase I: Recolección de información e investigación referente a estudios realizados con del método en estudio y las posibles mejoras respecto a los métodos convencionales. Basándose en la información recogida se establecieron los aspectos positivos de la investigación, definiendo qué criterios eran los más considerables a analizar y de qué forma se podría analizar la información enfocándola al beneficio de las ciencias del suelo.
- Fase II: Se estableció el equipo necesario para los ensayos propuestos, con las características necesarias para los análisis posteriores. Así mismo, se recopiló muestras representativas de los suelos de diferentes predios de la Región Pampeana.
- Fase III: Ejecución de los ensayos de laboratorio, se realizaron siguiendo los lineamientos consultados en la literatura y documentos investigativos, logrando determinar los límites de consistencia del suelo. En total se analizaron 43 muestras de suelos de la Región Pampeana.
- Fase IV: Se comparó los valores observados y estimados del método estudiado, determinando las ecuaciones predictivas y la viabilidad en su aplicación. También se realizó un análisis comparativo de los métodos indirectos usados para medir la expansividad de los suelos. Para esto se realizaron los análisis matemáticos correspondientes consiguiendo de esta forma las ecuaciones necesarias para los objetivos de esta tesina y las conclusiones respectivas.

3. Análisis del problema

3.1. Descripción de la situación actual

Como se mencionó en punto 1.1, actualmente no ha reportado ningún trabajo en la Región Pampeana en el cual se planteó una ecuación predictiva para los límites de Atterberg, que incluyan el porcentaje de arcilla y materia orgánica del suelo como variables predictoras. Además, a través de estos límites también se puede conocer la expansividad de los suelos, la cual es de mucha importancia para la ingeniería civil, la arquitectura, la ingeniería agronómica, la geología, para los docentes y estudiantes que estudian el suelo, permitiéndoles conocer su comportamiento mecánico. Por lo tanto, de acuerdo con las ideas principales expuestas, la pregunta de investigación del problema que mejor puede englobar es: ¿La obtención de una ecuación matemática que se derive de los análisis de los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio podrá ser altamente predictiva y determinará si uno de los factores cómo la materia orgánica influirá en los límites y en la expansividad de los distintos suelos pampeanos?

4. Solución del problema

4.1. Solución propuesta

Esta tesis propone encontrar una ecuación predictiva para cada límite de Atterberg (líquido y plástico) y que sea utilizada como una herramienta útil para el ingeniero civil y otros profesionales que estudian el suelo, ingresando los valores (variables) en el modelo a determinar, se podrá obtener de manera rápida y aproximada el valor para cada límite requerido.

5. Desarrollo documental

5.1. Área de estudio

El área de estudio fue la Región Pampeana, donde se tomaron 43 muestras de suelo (0-20 cm) de profundidad. Las muestras fueron colocadas en bolsas plásticas y se identificaron con los siguientes datos: número de muestra, sector, tipo de suelo, uso del suelo y la georeferencia. Las nueve localidades en estudio fueron las siguientes: Castelar, Chivilcoy, Luján, San Pedro, Arminda, Oliveros, Bengolea, Pergamino y Paraná (Figura 5.1).



Figura 5.1 Localización de los sitios de muestreo de suelos en la Región Pampeana.

5.2. Geología de la Región Pampeana

La Región Pampeana es la única cuenca sedimentaria en el hemisferio sur con sedimentos loésicos o loessoides depositados durante el Cuaternario. Es una extensa planicie donde afloran sedimentos eólicos cuaternarios, parcialmente retrabajados por acción fluvial. Se extiende por más de 500.000 km² en la zona este y central de Argentina (entre 32°-38°LS y 58°-63°O). La superficie es llana a ligeramente ondulada (Tófaló et al., 2011). La superficie refleja la deflación eólica y la acumulación loésica durante el Cenozoico tardío y el registro Pleistoceno comprende sedimentos loessoides profundamente modificados por procesos pedogénicos que da origen a paleosuelos soldados (Zárate, 2003). Estos tipos de sedimentos se encuentran también en China, en Siberia y en Estados Unidos. En el caso de la Región Pampeana es de naturaleza volcánico-piroclástica, procede del arco magmático de los Andes y el polvo volcánico se depositó distalmente en las planicies continentales, ambientes límnicos y la plataforma continental. El polvo volcánico constituye una importante fracción del loess pampeano, que cae directamente, es atrapado por la vegetación o redistribuido por distintos agentes de transporte (Cumba e Imbellone, 2004).

5.3. Procedimiento y equipo utilizado

5.3.1. Límites de Atterberg

Para el desarrollo del modelo predictivo fue necesario conocer mediante los respectivos ensayos de laboratorio los valores del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad; los cuales son los estados de consistencia del suelo según su humedad, realizándose las siguientes pruebas:

5.3.1.1. Límite Líquido (LL)

Para la determinación de este límite se utilizó el método ASTM - D4318. El equipo que se utilizó para realizar el ensayo fue el siguiente:

- Aparato de límite líquido (cuchara de Casagrande) que consiste en una cuchara de bronce con una masa de 200 ± 20 gr. montada sobre una base fija de madera.
- Ranurador (Casagrande o ASTM).
- Espátula.
- Plato de evaporación de porcelana de 120 mm de diámetro.
- Horno de secado con circulación de aire y temperatura regulable capaz de mantenerse en $110^{\circ} \pm 5^{\circ}$ C.
- Balanza con precisión de 0.01 gr.
- Herramientas y accesorios. Placas de vidrio, agua destilada, recipientes herméticos, tamiz N° 40 y una probeta de 25 ml de capacidad.

El procedimiento del ensayo fue el siguiente (ASTM - D4318):

- Paso 1: Se seleccionó una cantidad aproximada de 150 a 200 gramos de suelo que haya pasado el tamiz N°40. Se humedeció la muestra con un gotero con el fin de que adquiriera la consistencia necesaria. Se colocó una cantidad adecuada del suelo dentro de la cazuela, se comprimió y extendió con el fin de dejar una profundidad de 10 mm en el punto de su máximo espesor.
- Paso 2: Con el ranurador se hizo una pasada firme, hundiendo el biselado de este hacia adelante en una línea que iba desde el punto más alto hasta el más bajo del borde de la cazuela (Figura 5.2).
- Paso 3: A continuación, se levantó y golpeó la cazuela girando la manija a una velocidad de dos golpes por segundo, esto se hizo hasta que las

dos mitades de la pasta del suelo se pusieran en contacto de la ranura, con una distancia de 13 mm (1/2”).

- Paso 4: Se registró el número de golpes que se hicieron para que cerrara de manera adecuada la ranura. Se tomó una muestra del material y se colocó en un recipiente de masa conocida y se tapó.
- Paso 5: Se repitió varias veces el procedimiento de tal manera que se tuvieran diferentes muestras, esto con el fin de que los golpes para cerrar la ranura oscilaran entre los siguientes intervalos: 25-35, 20-30 y 15-25.
- Paso 6: Se colocaron las muestras en el horno a temperatura de 24 ± 4 horas, a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ con el fin de obtener las humedades representativas en cada muestra.



Figura 5.2. Ensayo de límite líquido (Fuente: el autor).

5.3.1.2. Límite Plástico (LP)

Para la determinación de este límite e igual al anterior se utilizó el método ASTM - D4318. El equipo que se utilizó para realizar el ensayo es el siguiente:

- Plato de evaporación de porcelana de 120 mm de diámetro.
- Espátula.
- Placa de vidrio esmerilado como superficie de amasado.
- Horno de secado con circulación de aire y temperatura regulable capaz de mantenerse en $110^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- Patrón de comparación, en este caso se usó un alambre de 3 mm de diámetro.
- Balanza con precisión de 0,01 g.

- Herramientas y accesorios: Malla N° 40, agua destilada y recipientes.

El procedimiento de ensayo fue el siguiente (ASTM - D4318):

- Paso 1: Se seleccionó una cantidad aproximada de 20 gramos del material preparado para el ensayo del límite líquido. Se buscó que el material alcanzara una consistencia que permitiera enrollarlo sin que se pegara a las manos.
- Paso 2: De este material se tomó una porción de 1,5 a 2 gramos, se hizo rodar la masa del suelo en la palma de la mano o los dedos y la placa de vidrio, con la presión que se necesitó para formar un rollo de hasta 3,2 mm (1/8"), en no más de 2 minutos
- Paso 3: Cuando se llegó a este diámetro, se dividió en varios trozos, se juntaron y comprimieron, de tal manera que se tuviera una masa elipsoidal.
- Paso 4: Se tomaron estas porciones de suelo desmoronado y se colocaron en un recipiente adecuado de masa conocida.
- Paso 5: Se repitió el procedimiento 2 veces hasta obtener un peso de 6 gramos, es decir, dos muestras de 6 gramos.
- Paso 6: Se colocaron las muestras en el horno a temperatura de 24 ± 4 horas, a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ con el fin de obtener las humedades representativas en cada muestra.



Figura 5.3. Ensayo de Límite plástico (Fuente: el autor).

5.3.1.3. Índice de Plasticidad (IP)

El índice de plasticidad se lo obtuvo con la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico (Das, 2015) como se muestra en la ecuación 16.

$$IP = LL - LP$$

Ecuación 15. Índice de plasticidad.

5.3.2. Expansividad del suelo

La expansividad del suelo se determinó mediante seis métodos indirectos, para su evaluación se utilizaron diferentes variables tales como el LL, LP, coeficiente de extensibilidad lineal (COLE), capacidad de intercambio catiónico (CIC), contenido o fracción de arcilla y el índice plástico. Los métodos que se probaron en esta tesina fueron: Seed et al. (1962) que utiliza el índice de plasticidad; Van der Merwe (1964) la fracción de arcilla y el índice de plasticidad; Dakshanamantny y Raman (1973) el límite líquido; Chen (1988) el índice de plasticidad; Thomas et al (2000) el COLE; y Yilmaz (2004) la CIC. Estos métodos se detallan a continuación.

5.3.2.1. Determinación del COLE.

Para esta determinación se humectaron los agregados de suelo y una vez saturados se los secó superficialmente con un papel absorbente. Posteriormente y aplicando el principio de Arquímedes, se determinó su volumen, sumergiéndolos en un recipiente con kerosene dispuesto sobre una balanza. Por último, los agregados se secaron en estufa a 105 °C y se pesaron. Estos volúmenes fueron utilizados en la ecuación (17) para determinar el coeficiente de extensibilidad lineal (COLE), el cual es un valor que marca la fracción de cambio en la dimensión de los agregados al pasar de un estado seco a otro húmedo. Puede ser usado para hacer inferencias acerca de la capacidad de un suelo a contraerse y expandirse, como de la mineralogía de las arcillas presentes en el mismo (USDA, 1999).

$$COLE = \left(\frac{V_{30}}{V_d} \right)^{1/3} - 1$$

Ecuación 16. Fórmula para la determinación del COLE

Siendo:

- V30: volumen ocupado por los agregados con un contenido de humedad correspondiente a un potencial mátrico de 30kPa
- Vd: volumen ocupado por los agregados secados a estufa a 105°.

5.3.2.2. Determinación por el método Yilmaz.

Este método propone que el límite líquido y la CIC son factores que controlan las características de expansividad de los suelos. Por tanto, este autor desarrolló una tabla (Tabla 1) para valorar la expansividad en función del CIC.

Tabla 1. Clasificación de la expansividad propuesto por Yilmaz (2004).

CIC (meq/100 g)	Clasificación de expansividad
<27	Baja
27-37	Media
37-55	Alta
>55	Muy alta

De acuerdo con este criterio, se tomaron los valores de CIC determinados en este trabajo y se procedió a clasificar los niveles de expansividad de los suelos según el criterio propuesto.

5.3.2.3. Determinación por el método Van der Merwes

Es un método que predice el aumento potencial debido al cambio de humedad de un estado relativamente seco a un estado casi saturado de un suelo. Para este método, se utilizó la fracción de arcilla (% de partículas $\leq 2\mu\text{m}$) y el índice de plasticidad de toda la muestra (Figura 6.4).

5.3.2.4. Determinación por el método Dakshanamanthu y Raman.

Este método propone que el límite líquido es un factor que controla las características de expansividad de los suelos. Por tanto, este autor desarrolló una tabla (Tabla 2) para valorar la expansividad en función del LL.

Tabla 2. Clasificación de la expansividad propuesto por Dakshanamanthu y Raman (1973).

Límite Líquido (%)	Clasificación de expansividad
0-20	No expansivo
20-35	Bajo
35-50	Medio
50-70	Alto

De acuerdo con este criterio, se tomaron los valores de LL determinados en este trabajo y se procedió a clasificar los niveles de expansividad de los suelos según el criterio propuesto.

5.3.2.5. Determinación por el método Chen.

Este método propone que el límite líquido (LL) e índice plástico (IP) son factores que controlan las características de expansividad de los suelos. Por tanto, este autor desarrolló una tabla (Tabla 3) para valorar la expansividad en función de estos dos factores.

Tabla 3. Clasificación de la expansividad propuesto por Chen (1988).

Grado de expansividad	LL	IP
Bajo	<30	0-15
Medio	30-40	10-35
Alto	40-60	20-55
Muy alto	>60	>35

De acuerdo con este criterio, se tomaron los valores de LL determinados en este trabajo y se procedió a clasificar los niveles de expansividad de los suelos según el criterio propuesto.

5.3.2.6. Determinación por el método Seed.

Este método se determina en función del índice de plasticidad. Es una manera sencilla de medir la expansividad con la consistencia del suelo. El cálculo se realizó con la siguiente ecuación:

$$SP = 0,0036 * IP^{2,44}$$

De acuerdo con este criterio, se tomaron los valores de IP determinados en este trabajo y se procedió a clasificar los niveles de expansividad de los suelos según el criterio propuesto.

5.3.3. Determinación del CIC.

Esta determinación se realizó con el método propuesto por Sumner y Miller (1996) y es la sumatoria de bases intercambiables presentes en el suelo. Los valores de CIC se determinaron con el uso de acetato de amonio a pH 7.1 N, se tomaron 5 gr de suelo en 50 ml de acetato de amonio por 30 minutos. Luego se procedió a hacer la lectura de las bases intercambiables con la ayuda de un espectrofotómetro de llama calibrado en la longitud de onda para cada base intercambiable.

5.3.4. Determinación del porcentaje de partícula.

Es el contenido relativo de partículas de diferente tamaño, como la arena, el limo y la arcilla, en el suelo. La textura tiene que ver con la facilidad con que se puede trabajar el suelo, la cantidad de agua y aire que retiene y la velocidad con que el agua penetra en el suelo y lo atraviesa (Cosentino y Fernández, 1996).

5.3.4.1. Método de Bouyoucos

El equipo que se utilizó para realizar el ensayo es el siguiente:

- Batidora eléctrica para la dispersión del suelo
- Hidrómetro de Bouyoucos calibrado desde 0 a 60 g de suelo en suspensión por litro, con escala en g/lt.
- Probetas de sedimentación de 1 lt.
- Agitador manual para probetas de 1 lt.
- Termómetro.
- Vasos de precipitados de 1 lt.
- Agente dispersante: solución de hexametáfosfato de sodio (HMF).
- Estufa 105°C.
- Cronómetro

El procedimiento de ensayo fue el siguiente (Bouyoucos, 1962):

- Paso 1: se colocaron 50 g de suelo en la copa de dispersión y se agregó 100 ml del agente dispersante y se dejó en reposo toda la noche.
- Paso 2: al siguiente día se agitó por 30 minutos y luego se vertió el contenido a una probeta de 1000 ml. Finalmente, se aforó con agua de la llave.

- Paso 3: se agitó con el émbolo 10 veces verticalmente y se sumergió cuidadosamente el hidrómetro en la suspensión.
- Paso 4: se anotó la lectura del hidrómetro en la suspensión a los 40 segundos de haber cesado la agitación. Se dejó en reposo por dos horas y se volvió a tomar lectura con el hidrómetro.



Figura 5.5. Método de Bouyoucos (Fuente: el autor).

5.3.5. Materia orgánica del suelo

Para la determinación de la materia orgánica, se utilizó el método propuesto por Walkley y Black (1934), en el cual propusieron un factor de corrección aceptado universalmente. Por lo tanto, se considera que este método da una aproximación semicuantitativa del C orgánico debido a la falta de un factor apropiado para cada suelo analizado.

5.3.5.1. Método de Walkley y Black

El equipo que se utilizó para realizar el ensayo es el siguiente:

- Balanza analítica
- Matraces aforados de 250 ml
- Erlenmeyer de 250 ml
- Pipetas de 1, 5, 10 y 25 ml
- Microbureta de 10 ml.

El procedimiento de ensayo fue el siguiente (Walkley y Black, 1934):

- Paso 1: se pesó de 1 a 0,5 g de suelo dependiendo su color, tamizado por tamiz 0,5 mm. Y se introdujo en un matraz aforado de 250 ml.

- Paso 2: se incorporó 10 ml de dicromato de potasio 1N y 20 ml de ácido sulfúrico concentrado y se dejó reposar por 20 minutos.
- Paso 3: luego se enrasó a 250 ml con agua destilada, se mezcló con movimiento de inversión tapando con un tapón de plástico y se dejó enfriar.
- Paso 4: se pipeteó 10 ml de la solución anterior y se introdujo en un erlenmeyer de 125 ml y se agregó 1 ml de ácido fosfórico concentrado
- Paso 5: finalmente se procedió a titular con sulfato ferroso amónico 0,1 N (sal de Mohr), hasta que una gota haga virar de color azul a verde.



Figura 5.6. Determinación de la materia orgánica (Fuente: el autor)

Cálculos:

$$\%C = \left(\frac{\left(1 - \frac{M}{B}\right) * 3,9}{P} \right) * fh$$

Ecuación 17. Fórmula para el porcentaje de carbono orgánico

Donde:

- M: ml de sulfato ferroso amónico 0,1 N utilizado para titular la muestra.
- B: ml de sulfato ferroso amónico 0,1 N utilizado para titular el blanco.
- 3,9: = (10 * (12 / 4000) * (100 / 0,77)).
- 10: son los mililitros de dicromato de potasio.

- 12 / 4000: es el peso en miliequivalentes (meq) de carbono en gramos.
- 0,77: es el factor de corrección por oxidación (Walkley y Black).
- 100: para expresar en por ciento.
- P: peso de suelo.
- fH: factor de humedad de la muestra.

$$\%MO = \%C * 1,72$$

Ecuación 18. Fórmula para el porcentaje de materia orgánica

5.3.6. Modelos predictivos

Finalmente se realizaron los análisis estadísticos y matemáticos planteados como objetivos en el presente trabajo de tesis, llevándose a cabo este proceso de cálculo mediante los softwares Excel (Microsoft, 2018) e Infostat (Di Rienzo et al., 2018). En este punto del trabajo, se destaca la disponibilidad de los datos necesarios para obtener las distintas relaciones y correlaciones entre las variables estudiadas: porcentaje de partícula del suelo (arcilla, limo y arena), materia orgánica, límites de Atterberg, COLE y CIC. De esta manera se determinó el modelo matemático de mayor ajuste y por ende de mayor predicción para los límites de Atterberg en los suelos de la Región Pampeana.

6. Resultados y discusión

6.1. Desarrollo de un modelo predictivo para los límites de Atterberg (límite líquido y límite plástico) para suelos con diferente porcentaje de arcilla y contenido de materia orgánica en suelos de la Región Pampeana y la evaluación de la expansividad por métodos indirectos.

Como primer paso para determinar los modelos predictivos, se realizó un análisis de correlación entre las variables edáficas estudiadas (arcilla, limo, arena y MO) con respecto a los límites de Atterberg (Tabla 4), con la finalidad de conocer su interacción. Para el límite líquido (LL) se encontró que la más alta correlación positiva fue con la arcilla ($r=0,79$), al igual que Seybold et al. (2008); y una correlación negativa con la arena ($r=-0,65$), similar a lo reportado por Dc Jong et al. (1990). El límite plástico (LP) tuvo la más alta correlación positiva con la materia orgánica (MO) seguido de la arcilla y limo ($r=0,36$; $r=0,35$) respectivamente. La arena tuvo una correlación negativa ($r=-0,48$) mostrando la misma tendencia en el LL.

Tabla 4. Matriz de correlación entre las variables edáficas y los límites de Atterberg

Matriz de correlación/Coeficientes						
	LL	LP	Arcilla	Limo	Arena	MO
LL	1					
LP	0,61	1				
Arcilla	0,79	0,35	1			
Limo	0,17	0,35	0,04	1		
Arena	-0,65	-0,48	-0,7	-0,74	1	
MO	0,4	0,36	0,07	0,21	-0,2	1

El LL presentó los coeficientes de correlación más altos con las variables estudiadas en comparación con el LP, lo cual es concordante con otros estudios (Dc Jong et al., 1990; Seybold et al., 2008). Investigaciones realizadas en suelos británicos encontraron que el contenido de arcilla tuvo mayor correlación con el LL y en menor grado con el LP (Farrar y Coleman, 1967; Keller y Dexter, 2012; Salahedin, 2013), coincidiendo con los resultados de esta tesis. Así mismo, Larney et al. (1988) encontró correlaciones débiles entre el contenido de arcilla y el LP, corroborando lo

encontrado en el presente estudio. Los coeficientes de correlación obtenidos para la MO con respecto al LL y LP son significativos en este trabajo. Sin embargo, Stanchi et al. (2009) encontró que la única correlación para la MO fue con el LP, lo cual difiere con los suelos estudiados de la Región Pampeana.

6.1.1. Modelo predictivo para el límite líquido (LL)

Para obtener el modelo predictivo se utilizó un análisis de selección de modelos (Stepwise) utilizando todas las variables edáficas (arcilla, limo, arena y MO) como variables independientes (X) y el LL como variable dependiente (Y). Este análisis determinó que solo la arcilla y la MO son significativas ($p < 0,05$) para el modelo predictivo. Means y Parcher (1965), mencionan que el LL es dependiente de los constituyentes minerales del suelo y de la intensidad de las cargas superficiales, con lo cual se explica que estas variables hayan sido seleccionadas por el modelo para el LL. en la Tabla 5, se muestran el análisis de los coeficientes de regresión resultantes para el modelo del LL.

Tabla 5. Coeficientes de regresión y estadísticos asociados para el LL.

Análisis de regresión lineal						
Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC
LL	43	0,74	0,72	1,8 E-03	-153,59	-146,54
Coeficientes de regresión y estadísticos asociados						
Coef	Est.	E.E.	LI (95%)	LS (95%)	T	p-valor
Const	0,12	0,03	0,07	0,17	4,49	0,0001
Arcilla	0,01	6,5 E-04	4,8 E-03	0,01	9,41	<0,0001
MO	0,02	0,01	0,01	0,03	4,23	0,0001

El modelo desarrollado explica en un 74% que variación del LL se encuentra explicado por la variación de las variables arcilla y MO (Tabla 5). Este porcentaje junto con el valor de inflación de la varianza (VIF) y el intervalo de confianza de la constante, demuestran que las variables ingresadas en el modelo son matemáticamente significativas y que el modelo es confiable (Di Renzo et al., 2018). El modelo predictivo obtenido para el LL fue el siguiente:

$$LL = 0,01(arcilla) + 0,02(MO) + 0,12$$

Ecuación 19. Modelo predictivo para el LL en suelos de la Región Pampeana.

De acuerdo con el modelo encontrado (ecuación 20), el LL aumenta con el contenido de arcilla y MO (Warrick, 2002; Moradi y Ebrahimi, 2013). Así mismo, al incremento del contenido de arcilla le sigue el aumento del LL en una relación lineal, lo cual concuerda con otras investigaciones realizadas en Inglaterra y Kenia (Widjaja y Kurniawan, 2020). Adicionalmente, los valores de LL hallados en los suelos estudiados se encuentran dentro del rango universalmente aceptado para un proyecto de ingeniería civil (Das, 2005).

6.1.2. Modelo predictivo para el límite plástico (LP)

Para obtener este modelo predictivo primeramente se utilizó un análisis de selección de modelos (Stepwise) utilizando todas las variables edáficas (arcilla, limo, arena y MO) como variables independientes (X) y el LP como variable dependiente (Y). Este análisis determinó que solo la arena y la MO son significativas ($p < 0,05$) para el modelo predictivo. Sin embargo, el coeficiente de determinación (R^2) resultante fue bajo (Tabla 6). Debido a este resultado se analizó las correlaciones mostradas en la Tabla 1 y se observó que la mayor correlación positiva para el LP fue el LL ($r = 0,61$).

Tabla 6. Coeficientes de regresión y estadísticos asociados para el LP.

Análisis de regresión lineal						
Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC
LP	42	0,47	0,45	7,1 E-04	-185,54	-146,54
Coeficientes de regresión y estadísticos asociados						
Coef	Est.	E.E.	LI (95%)	LS (95%)	T	p-valor
Const	0,12	0,01	0,2	0,26	15,68	<0,0001
Arena	-1,3 E-03	2,9 E-04	-1,8 E-03	-6,7 E-04	-4,31	0,0001
MO	0,01	3,5 E-03	3,9 E-03	0,02	3,13	0,0033

Debido a la alta correlación entre el LL y LP, se obtuvo el modelo predictivo para el LP con mayor nivel de confianza. El modelo resultante fue una tendencia polinómica de grado 3 que se detalla en la ecuación 21 y se muestra gráficamente en la Figura 6.1.

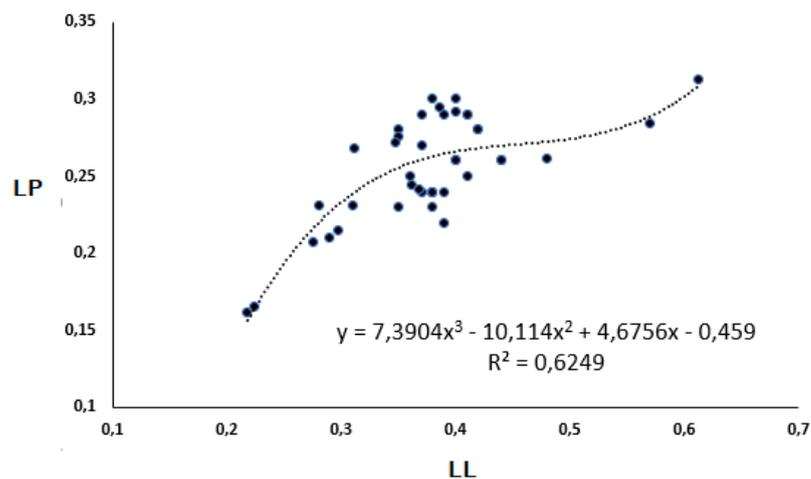


Figura 6.1. Gráfico de tendencia del modelo predictivo para el LP en suelos de la Región Pampeana.

El modelo desarrollado explica en un 63% que variación del LP se encuentra explicada por la variación del LL, con lo cual se demuestra que esta variable es matemáticamente significativa y que el modelo es confiable (Colin et al., 1997; Di Renzo et al., 2018). El modelo predictivo obtenido para el LP fue el siguiente:

$$LP = 7,39LL^3 - 10,11LL^2 + 4,68LL - 0,46$$

Ecuación 20. Modelo predictivo para el LP en suelos de la Región Pampeana

La baja correlación entre el contenido arcilla y el LP encontrada en este trabajo, también fue reportada por Larney et al. (1988) quienes encontraron correlaciones débiles entre el contenido de arcilla y el LP. La relación existente entre LL y LP se debe al contenido de humedad o consistencia del suelo, es decir por la cantidad de agua adsorbida en las fracciones finas. Esta interacción explicaría la alta correlación hallada entre dichos límites (Tabla 4). Por otra parte, Williams et al. (1983) mencionan que los modelos predictivos desarrollados a partir de bases de datos con diferente textura de suelo, pero sin tener en cuenta la composición mineralógica de las arcillas, muestran resultados contradictorios cuando quieren ser validados con resultados obtenidos en suelos con baja y alta actividad de arcillas. Estos autores recomiendan para el desarrollo de ecuaciones de transferencia, que los programas de investigación contemplen la separación de éstas tanto por grupos de tamaño de partícula como por mineralogía de arcillas.

6.2. Evaluación de la expansividad con diferentes métodos indirectos.

Para cumplir con este objetivo se utilizaron seis métodos analíticos los cuales fueron: Seed et al. (1962) que para su determinación utiliza el índice de plasticidad; Van der Merwe (1964) la fracción de arcilla y el índice de plasticidad; Dakshanamanthu y Raman (1973) el límite líquido; Chen (1988) el índice de plasticidad; Thomas et al (2000) el COLE; y Yilmaz (2004) la CIC. En la Figura 6.2 se muestran los métodos estudiados sin considerar el método COLE ya que se lo utilizará para cumplir con el último objetivo específico.

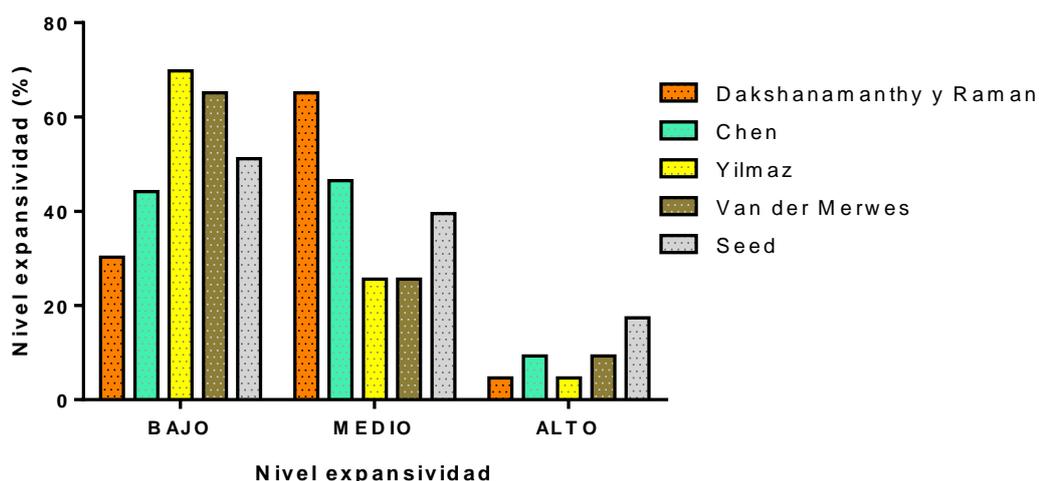


Figura 6.2. Niveles de expansividad por diferentes métodos analíticos en suelos de la Región Pampeana.

La clasificación de los niveles de expansividad por los cuatro métodos indirectos, el método Dakshanamurthy y Raman, (1973) clasificó en mayor porcentaje (65,12%) como nivel medio de expansividad. El método CIC (Yilmaz, 2004) clasificó en mayor porcentaje (69,7%) como nivel bajo de expansividad y el método Seed (Seed et al., 1962) clasificó en mayor porcentaje (17,39%) como niveles altos de expansividad, siendo ésta la única clasificación que obtuvo este nivel. De los suelos estudiados los que presentaron niveles más altos de expansividad fueron los provenientes de la provincia de Entre Ríos, donde se encuentran la mayor parte de los Vertisoles de la Argentina, estos suelos poseen un alto contenido de minerales de arcilla

expansiva, especialmente montmorillonitas, que forman profundas grietas al secarse (Moscatelli et al., 2014) citado en Conti y Guiffré (2014).

Yilmaz (2004) menciona que el límite líquido y la CIC son factores que controlan las características de hinchamiento de los suelos y asoció estas dos variables en una tabla para valorar la expansividad. La capacidad de intercambio catiónico es un parámetro que se ve afectado por el tipo de mineral de arcilla. Por otra parte, comparó sus resultados con el método propuesto por Van der Merwes (1964) y observó que los resultados fueron aproximados, lo cual coincide con lo encontrado en este trabajo. Con la finalidad de comprobar la relación propuesta por Yilmaz (2004), se utilizaron los datos de esta tesina, comprobándose la misma tendencia exponencial (Figura 6.3). Adicionalmente, y de acuerdo con esta clasificación, se observan que la mayoría de los suelos se encuentran en niveles bajos de expansividad y solamente dos en niveles altos.

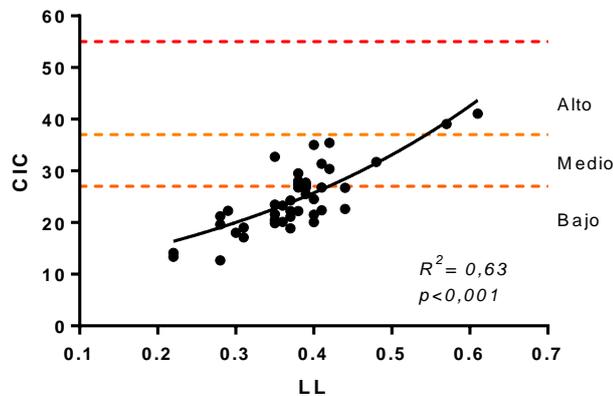


Figura 6.3. Relación entre el LL y CIC propuesta por Yilmaz (2004).

Siguiendo con los análisis de expansividad, se aplicó el modelo propuesto por Van der Merwes (1964), el cual relaciona la fracción de arcilla con el índice plástico del suelo (Figura 6.4). Este análisis también clasificó con valores altos de expansividad a los suelos de la provincia de Entre Ríos, lo cual es coincidente con la literatura científica. De acuerdo con Stanciu et al. (2011) se han realizado numerosos intentos para encontrar un sistema aceptable para evaluar el potencial de hinchamiento. Los sistemas más utilizados para la evaluación indirecta y clasificación del potencial de oleaje

se basan en la correlación gráfica entre dos o más índices geotécnicos, en el que se distingue el método Van der Merwes.

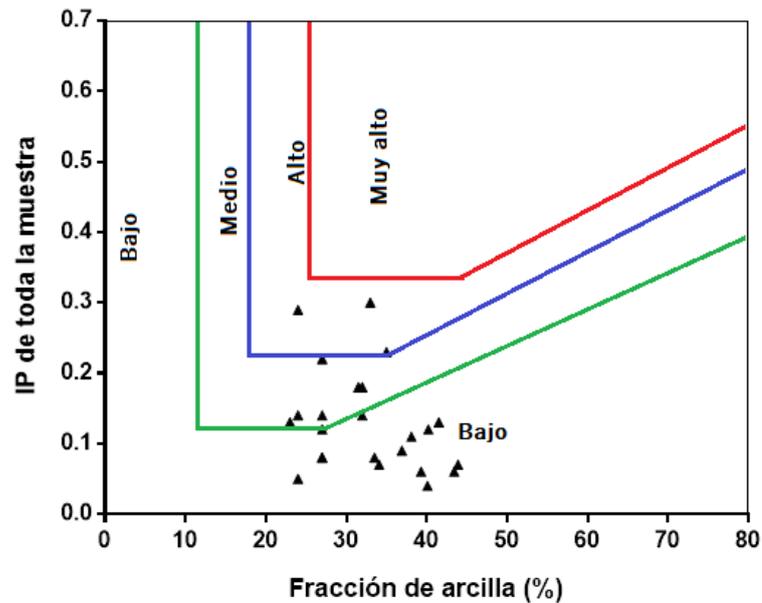


Figura 6.4. Niveles de expansividad por el modelo Van der Merwes (1964) en suelos de la Región Pampeana.

Los métodos empíricos deben considerarse como simples métodos indicadores de hinchazón y nada más (Bell y Culshaw, 1998; Bell y Maud, 1995) y se pueden utilizar para evaluar el potencial de hinchamiento de suelos expansivos. En el caso de los suelos de Entre Ríos, sería de suma importancia analizar el nivel de expansividad para todo proyecto de ingeniería civil. De acuerdo con Chen (1988), estos análisis deben incluirse como pruebas de rutina en la investigación de sitios de construcción en aquellas áreas que tienen suelos expansivos. Cabe destacar que, de los métodos indirectos utilizados en esta tesina, los de mayor coincidencia fueron los métodos Van der Merwes y Yilmaz. Adicionalmente, se pudo comprobar que estos métodos fueron aplicables en los suelos de la Región Pampeana.

6.3. Resultados para los objetivos específicos.

6.3.1. Análisis del modelo de mayor poder predictivo para los para los límites de Atterberg (LL y LP).

Para el análisis del modelo de mayor poder predictivo, se realizó relación comparativa entre los valores observados (determinados en laboratorio) y estimados (modelo predictivo) para cada límite de Atterberg (LL y LP). Para cada relación se buscó el mejor ajuste, el cual en ambos casos fue una relación potencial (Figura 6.5).

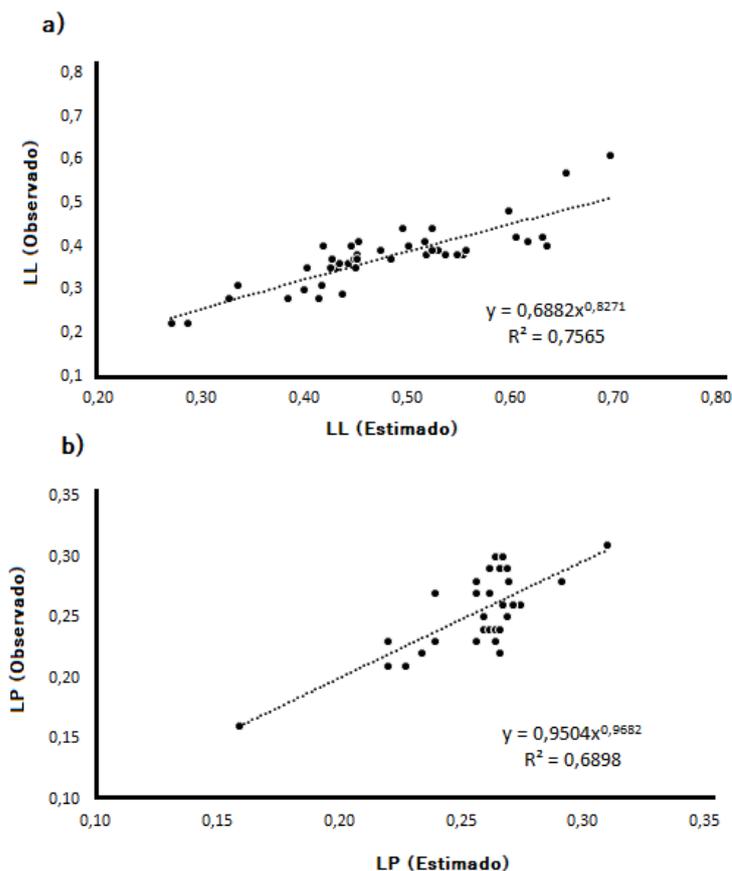


Figura 6.5. Relación entre los valores estimados y observados para LL y LP en suelos de la Región Pampeana.

El modelo de mayor poder predictivo fue el LL, el cual obtuvo el coeficiente de determinación (R^2) más elevado (Figura 6.5a) respecto al LP (Figura 6.5b). El coeficiente de determinación es un parámetro estadístico usado en el contexto de un modelo estadístico cuyo principal propósito es predecir futuros resultados, determina la calidad del modelo para replicar los resultados y la proporción de variación de estos que puede explicarse por el modelo (Colin et al., 1997).

6.3.2. Comparación de los modelos predictivos con otras investigaciones realizadas en la Región.

Para efectuar la comparación de los modelos predictivos propuestos en esta tesis, se tomó como referencia una investigación realizada en la Región (2013) que tuvo como objetivo estudiar las interacciones entre las propiedades físicas y la composición mineralógica de algunos suelos pampeanos (Bressan, 2013). De esta manera se procedió a tomar 15 muestras al azar con los datos publicados por este autor y se introdujo en el modelo los valores de arcilla y MO para la estimación del LL (Figura 6.6a) y el LL para estimar el LP (Figura 6.6b). Las tendencias resultantes se muestran a continuación.

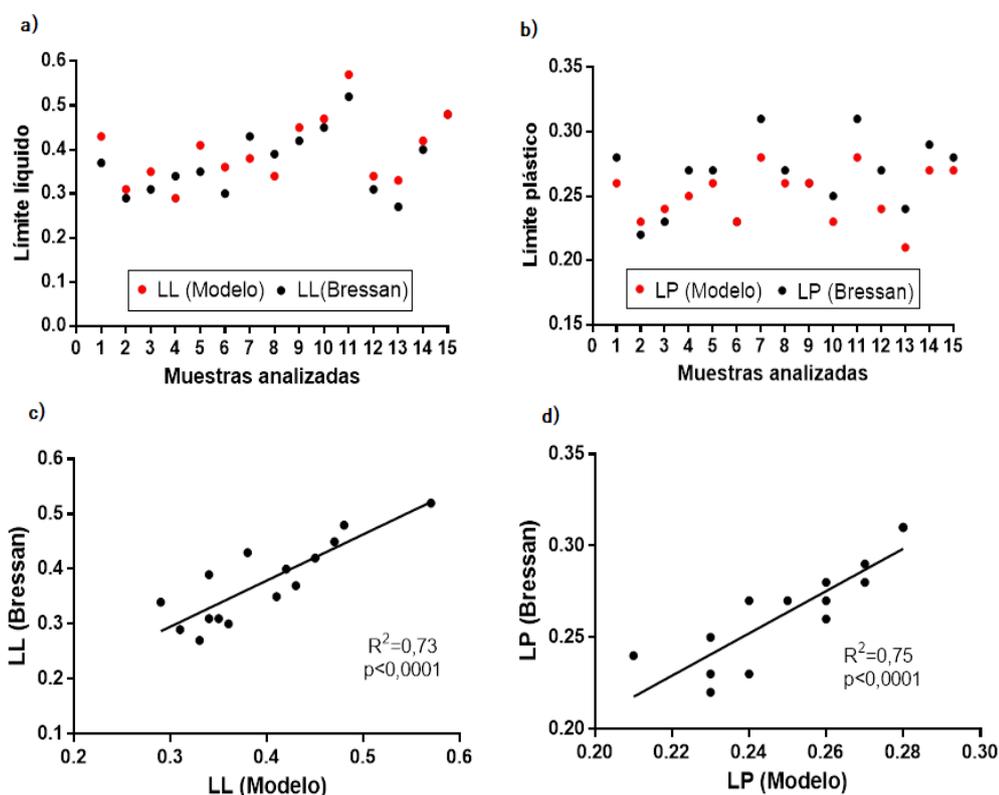


Figura 6.6. Comparación entre los modelos predictivos y otros resultados para los límites líquido y plástico de la Región Pampeana.

Como se muestra en la Figura 6.6d la relación para el LP fue la que obtuvo el mejor ajuste ($R^2=0,75$). Sin embargo, cabe destacar y de acuerdo con Colin et al. (1997), en ambos casos los modelos predictivos obtuvieron un

satisfactorio coeficiente de correlación lo que pone en evidencia el aceptable poder de predicción de los modelos propuestos en esta tesina.

6.3.3. Relación del método COLE con todas las variables estudiadas.

Para la siguiente determinación se realizó un análisis de correlación entre el COLE y las variables estudiadas (Tabla 7), donde se encontró que las correlaciones positivas más altas para COLE fueron con la arcilla y CIC ($r=0,74$; $r=0,69$) respectivamente, y la mayor correlación negativa fue con arena ($r=-0,48$). De todas las propiedades del suelo, se ha demostrado que el contenido de arcilla está relacionado con mayor frecuencia con el potencial de contracción expansión del suelo (Ross, 1978; Reeve et al., 1980; Karathansis y Hajek, 1985; Smith et al., 1985; Dc Jong et al., 1980; al., 1992) y CIC (Yule y Ritchie, 1980; Dc

Jong et al., 1992). Por otra parte, el contenido de materia de materia orgánica no tuvo correlación con el COLE, contrariamente a lo reportado por Reeve et al. (1980).

Tabla 7. Matriz de correlación y coeficientes asociados del COLE con las variables estudiadas.

Matriz de correlación/Coefficientes									
	COLE	Arcilla	Limo	Arena	MO	LL	LP	IP	CIC
COLE	1								
Arcilla	0,74	1							
Limo	-0,38	-0,56	1						
Arena	-0,48	-0,6	-0,32	1					
MO	0,03	-0,28	0,09	0,23	1				
LL	0,51	0,69	-0,3	-0,49	0,04	1			
LP	-0,09	0,02	-2,4 E-03	-0,01	0,17	0,41	1		
IP	0,59	0,68	-0,3	-0,49	-0,09	0,69	-0,38	1	
CIC	0,69	0,76	-0,56	-0,32	0,27	0,62	0,16	0,51	1

Para graficar la relación entre el COLE y las variables estudiadas, se realizó un análisis de componentes principales (ACP). Este análisis reveló que las dos componentes principales (CP 1 y CP 2) explicaron el 73,6 % de la variación total de la información, es decir, 54,5 % y 19,1 % por el CP 1 y el CP 2, respectivamente (Figura 6.7). Los resultados del ACP mostraron que los valores más altos de expansividad están influenciados por el contenido

de arcilla, LL, índice plástico y CIC. Los valores más bajos de expansividad por su mayor contenido de limo y arena. Esta tendencia es corroborada por análisis de correlación de Pearson (Tabla 4), donde el contenido de arcilla, LL, índice plástico y CIC correlacionan negativamente con el limo y arena.

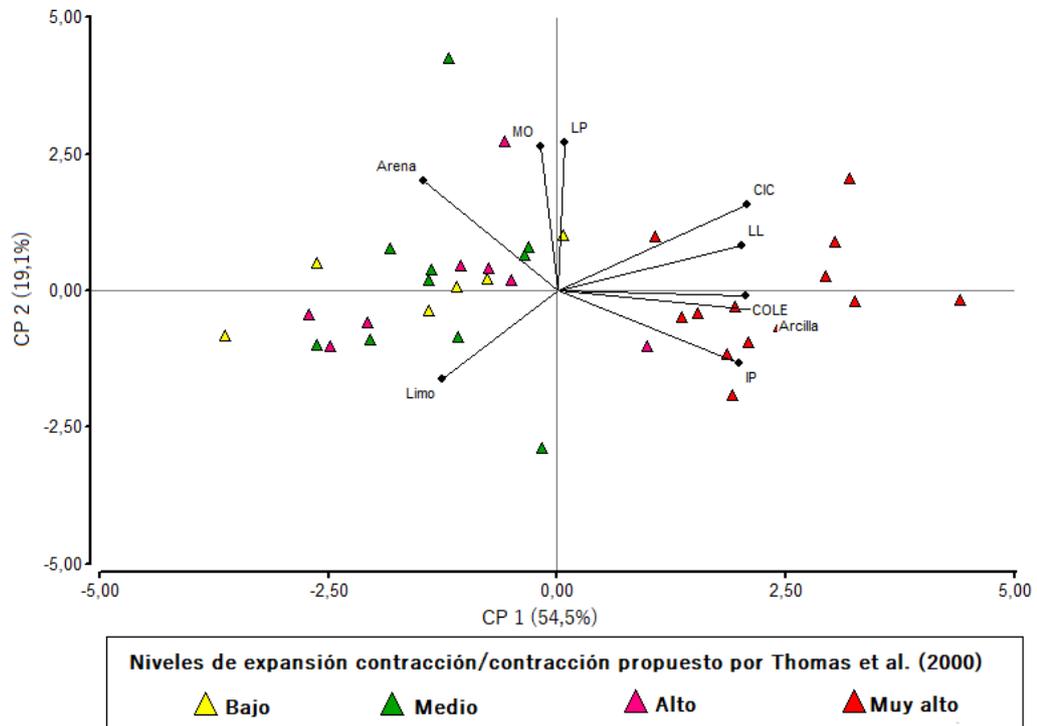


Figura 6.7. Análisis de componentes principales de los niveles de expansión contracción propuesto por Thomas et al. (2000).

En contraste con estos resultados, Yule y Ritchie (1980) y Gray y Allbrook (2002) no reportaron relación entre el porcentaje de arcilla y la contracción del suelo. Por otra parte, Meza (2005) propuso clasificar los suelos expansivos basado en el método COLE. Desde el punto de vista de la ingeniería, la contracción y el hinchamiento del suelo también pueden crear serios problemas para la construcción ya que es un factor importante en el diseño de la cimentación de cualquier estructura, y sobre todo para la prevención de la inestabilidad en el horizonte de su vida útil.

7. Conclusiones

En el presente trabajo de investigación se cumplieron con todos los objetivos propuestos, de acuerdo con el objetivo general, se realizaron satisfactoriamente los modelos predictivos para el LL y LP. Además, se comparó los diferentes métodos indirectos para la determinación de la expansividad de los suelos estudiados.

- Se estableció una relación lineal significativa entre el LL con las variables arcilla y MO. Este resultado demuestra la influencia positiva de dichas variables en el LL, destacando sobre todo que la MO si es una variable influyente en este parámetro.
- El LP tuvo un ajuste polinomial del 69% con el LL, con lo que se demuestra la relación entre ambos límites y se comprobó que ambos modelos poseen un aceptable nivel de predicción en suelos de la Región Pampeana.
- Los resultados de la expansividad con métodos indirectos de mayor coincidencia fueron Var der Merwes y Yilmaz. Se pudo verificar que estos métodos son aplicables en los suelos de la Región, donde los niveles más altos de expansividad fueron en las muestras provenientes de la provincia de Entre Ríos, donde se encuentran la mayor parte de los Vertisoles de la Argentina.
- El análisis de componentes principales mostró que los niveles más altos de expansividad están influenciados por las variables arcilla, LL, IP, COLE y CIC, y los niveles más bajos por su mayor contenido de limo y arena. Este resultado sugiere que tales variables deben ser consideradas para el estudio de la expansividad de los suelos.

7.1. Recomendaciones

Se recomienda incluir a la MO como un factor influyente sobre los límites de Atterberg y la expansividad de los suelos. Adicionalmente, también se recomienda una correcta calibración de los equipos de laboratorio a utilizar, como la técnica empleada para la determinación de las variables estudiadas.

7.2. Líneas futuras de investigación

Para estudios posteriores, se recomienda realizar pruebas que involucren la determinación del tipo de residuos, tasa de descomposición y calidad de la MO con respecto a las partículas minerales del suelo y analizar su influencia sobre los límites de Atterberg.

8. Glosario de términos especializados

ADSORCIÓN: Proceso de atracción de las moléculas o iones de una sustancia en la superficie de otra, siendo el tipo más frecuente el de la adhesión de líquidos y gases en la superficie de los sólidos. La adsorción es un fenómeno de naturaleza física o química.

PLASTICIDAD: Es atribuible al contenido de partículas escamosas de tamaño coloidal presentes en los suelos. Las partículas escamosas además son responsables de la alta compresibilidad y la baja permeabilidad de los suelos.

ARCILLA: es una roca sedimentaria descompuesta constituida por agregados de silicatos de aluminio, hidratados, procedentes de la descomposición de rocas que contienen feldespato, como el granito. Presenta diversas coloraciones según las impurezas que contiene, desde el rojo anaranjado hasta el blanco cuando es pura.

GRANULOMETRÍA: Es la medición de los granos de una formación sedimentaria y el cálculo de la abundancia de los correspondientes a cada uno de los tamaños previstos por una escala granulométrica con fines de análisis tanto de su origen como de sus propiedades mecánicas.

LIMITE LÍQUIDO: Cuando el suelo pasa de un estado plástico a un estado líquido.

LIMITE PLÁSTICO: Cuando el suelo pasa de un estado semisólido a un estado plástico.

9. Bibliografía

- Alvarado, S. & Baquero, M. 2011. Calibración de cono miniatura de laboratorio para determinar el límite líquido de los suelos. Universidad católica Andrés Bello. Venezuela.
- Atterberg, A. 1911. Über die physikalische Bodenuntersucgung, and ubre die Plastizität der Tone, Internationale Mgen für Bodenkunde, Vol.1.
- Badillo, J. & Rodriguez, R. 2005. Mecánica de suelos, Mexico, Editorial Limusa (2005)
- Baver, L. D.; W. H. Gardner y W. R. Gardner. 1972. Física de suelos. 1ª Ed. en español. U.T.E.H.A. México. 529 p.
- Bell, F. G. & Maud, R. R.1995. Environ. Eng. Geosci., 1, 41 (1995).
- Bell, F. G. & Culshaw, F. G. in Geohazards in Engineering Geology, Ed. by J. G. Maud and M. Eddleston (Geological Society, London, 1998), Engineering Geology Special Publications, No. 15, pp. 427–441.
- Beroya, MAA; A, Aydin; R Katsenbach. 2009. Insight into the effects of clay mineralogy on the cyclic behavior of silt-clay mixtures. Engineering Geology 106: 154-162.
- Bouyoucos, G.J. 1962. Hydrometer method for making particle size analisis de soils. Agrom. Jor. 54:464-465.
- Bressan, E. 2013. Interacciones entre propiedades físicas y composición mineralógica y granulométrica de suelos Argiudoles de la Pampa Ondulada. Tesis de Maestría. Universidad de Buenos Aires. 80-113 p.
- Cadena, M., Cantu, M., Campos, S., Ríos, M. 2010. Modelo para estimar un límite superior de laborabilidad del suelo en función de su textura y concentración de materia orgánica. Terra Latinoam [online]. 2010, vol.28, n.4, pp.297-305. ISSN 2395-8030.
- Cardona, D., González, J., Rivera, M. & Cárdenas, E. 2013. Inferencia Estadística. Módulo de Regresión Lineal simple. Universidad del Rosario, Bogotá, Colombia.
- Carrerira, D. 2005. Carbono oxidable – una forma de medir la materia orgánica del suelo. En: Marbán y Ratto (2005) tecnologías en análisis de suelos. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. ISBN 987-21419-1-6. Buenos Aires, Argentina. 91-100 pp.
- Casagrande, A. (1932). "Research on the Atterberg Limits of Soils", Public Roads 12(3), pp. 121-30 and 136.
- Céspedes, C., C. Ovalle, y J. Hirzel. 2005. Manejo de la fertilidad del suelo en producción orgánica. En Céspedes, C. (ed.) Agricultura orgánica: Principios y prácticas de producción. Boletín INIA N° 131. Ministerio de Agricultura, Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Chillán, Chile.

- Chen, F. H. and Huang, D., "Lateral Expansion Pressure on Basement Walls," in Proc. 4th Int. Conf. on Expansive Soils, New Delhi, Vol. 1, 1987, pp. 55–59.
- Chen, F.H. 1988. Foundations on Expansive Soils. 2nd Edition, Elsevier Science Publications, New York.
- Colin Cameron, A.; Windmeijer, Frank A.G.; Gramajo, H; Cane, DE; Khosla, C. 1997. «An R-squared measure of goodness of fit for some common nonlinear regression models». Journal of Econometrics 77 (2): 1790-2.
- Conti, M.E., Guiffré L. 2014. Reacción del Suelo, Edafología, Bases y Aplicaciones Ambientales Argentinas. Editorial Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires- Argentina. 513-535p.
- Cosentino, D.J., Fernández, F.M. 1996. Método del hidrómetro, modificado por Day 1965 y American Society for Testing and Materials (ASTM) 1985. Sistema de apoyo metodológico de laboratorios de suelo y agua (SAMLA).
- Crespo, C. 2004. Mecánica de Suelos y Cimentaciones. México: Limusa, S. A.
- Cumba, A., Imbellone, P. 2004. Micromorphology of paleosols at the continental border of the Buenos Aires province, Argentina. Revista mexicana de ciencias geológicas, ISSN 1026-8774, Vol. 21, N^o. 1, pags. 18-29. 21.
- Dakshanamurthy, V.& Raman, V. 1973. Jpn. Soc. Soil Mech. Found. Eng. 13, 97
- Das, B. 2015. Fundamentos de la ingeniería geotécnica. Cuarta Edición. Cengage Learning Editores, S.A. México. 638 p. ISBN: 978-607-519-373-1.
- Das, B. 2001. Fundamentos de Ingeniería Geotécnica. Thomson Learning, primera edición.
- Dc Jong, E.; Acton, D. F. and Stonehouse, H. B. 1990. Estimating the Atterberg limits of Southern Saskatchewan soils from texture and carbon contents. Can. J. Soil Sci. 70(4):543-554.
- De Jong, E., Kozak, L.M., Stonehouse, H.B., 1992. Comparison of shrink– swell indices of some Sasatchewan soils and their relationships to standard soil characteristics. Can. J. Soil Sci. 72, 429– 439.
- Di Rienzo, J., Casanoves, F., Balzarini, M., González, L., Tablida, M., Robledo, C. 2018. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- FAO. 1999. Base referencial mundial del recurso suelo”, Ed: FAO, ISRIC y SICS, 1999, págs. 90.
- Farrar, DM., JD Coleman. 1967. The correlations of surface area with other properties of nineteen British clay soils. J. Soil Sci. 18:118-124.
- García, S. 2013. Aplicabilidad del método del cono para medir los límites líquidos y plásticos de suelos de Guatemala. Tesis de grado, Facultad de Ingeniería Civil - Universidad San Carlos de Guatemala. 19p.
- García, J, M. 2008. Teoría y ejercicios prácticos de Dinámica de Sistemas. Fundación Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). Cataluña, España. 84 p.

- Graetz, H.A. 1997. Suelos y Fertilización. Traducido por: F. Luna Orozco. Trillas. México. 80 p.
- Gray, C.& Allbrook, R. 2002. Relationships between shrinkage indices and soil properties in some New Zealand soils. Department of Earth Sciences, University of Waikato, Private Bag 3105, Hamilton, New Zealand.
- Gee, G.W., Bauder, J.W. 1986. Particle size analysis. Cap 15 383- 409. In Methods of Soil Analysis Part 1 Physical and Mineralogical Methods Second edition (ed) Arnold Klute. ASASSSA.
- Grønbech, G., Nielsen, B., Ibsen, L. 2011. Comparison of liquid limit of highly plastic clay by means of casagrande and fall cone apparatus. Department of Civil Engineering –Aalborg University, Aalborg, Denmark.
- Gormley, H. L. L., Sinclair, L. 2003. Modelaje participativo del impacto de los árboles en la productividad de las fincas y la biodiversidad regional en paisajes fragmentados en América Latina. Agroforestaría en las Américas, 10: 103-108.
- Hillel, D. 1998. Environmental soil physics. Academic Press. San Diego. 771 p.
- ICONTEC. 1999. Método de ensayo para la determinación del límite líquido, del límite plástico y del índice de plasticidad de los suelos cohesivos. NTC 4630 (ASTM D 4318).
- Jackson, L.M. 1982. Análisis químico de suelos. Editorial Omega. 4ta Edición. Barcelona. España. 662 p.
- Karathansis, A.D., Hajek, B.F., 1985. Shrink– swell potential of montmorillonite soils in udic regimes. Soil Sci. Soc. Am. J. 49, 159– 166.
- Keller, T. and Dexter, A. R. 2012. Plastic limits of agricultural soils as functions of soil texture and organic matter content. Soil Res. 50(1):7-17.
- Larney, F. J.; Fortune, R. A. and Collins, J. F. 1988. Intrinsic soil physical parameters influencing intensity of cultivation procedures for sugar beet seedbed preparation. Soil Till. Res. 12(3):253-267.
- Means, RE., JV Parcher. 1965. Plasticity. In Physical properties of soils. PrenticeHall of India Ltd. Pags. 68-84.
- Meza, V.E. 2005. Influencia de la succión matricial en el comportamiento deformacional de dos suelos expansivos. MS Tesis Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Montenegro, H. y D. Malagón. 1990. Propiedades físicas de los suelos. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Bogotá. 813 p.
- Moradi, S. & Ebrahimi, E. 2013. elationship between the percentage of clay with liquid limit, plastic limit and plastic index in four different soils texture class. Department of Soil Science, Buali sina University, College of Agriculture, Hamedan, I. R. Iran.
- Moreno, G., Ríos, P., Romaniuk, R. 2014. Aspectos Morfológicos Destacados, en: Conti y Guiffre, 2014. Edafología, Bases y Aplicaciones Ambientales

- Argentinas. Editorial Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires-Argentina. 223-225p.
- Murthy, V. 2002. *Geotechnical Engineering, Principles and practices of Soil Mechanics and Foundation Engineering*. USA: CRC Press. 1029 p.
- Orestes, N., Shrade, F. K. and K. Beliz. 1994. Verification, validation and confirmation on numerical models in the earth science. *Science*, 264:641-646.
- Ortega, J. F., De Juan, J. A., Tarjuelo, J. M., Merino, R. y M. Valiente. 1999. Modelo de optimización económica del manejo del agua de riego en las explotaciones agrícolas: aplicación de la agricultura de regadío de la provincia de Toledo. *Invest. Agricultura y Producción Vegetal*, 14: 325-354.
- Patrone, J., Prefumo, J.E. 2005. La acción de los suelos expansivos sobre las cimentaciones métodos de prevención y control. *Memoria de Trabajos de Difusión Científica y Técnica*, ISSN 1510-7450, N°. 4. págs. 51-74.
- Perret, H.G. 2015. Estabilización de loess con silicato para uso vial. Universidad Católica de Córdoba [Tesis de Grado].
- Pérez, M. O., Delfín, C., Fregoso, A. y H. Cotler. 2006. Modelos de simulación para la elaboración y evaluación de los programas de servicios ambientales hídricos. *Gaceta Ecológica*, 78: 65- 84.
- Porta, J., Lopez, M., Roquero, C. 2003. *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Ed. Mundiprensa, 3ª edición, págs. 629.
- Rashidi, M. and M. Seilsepour. 2008. Soil available phosphorous pedotransfer function for calcareous soils of Varamin region. *Am.-Eurasian J.Sustain. Agric.*2: 98-103.
- Reed, J.S. 1995. *Principles of ceramic processing*, 2nd ed. Wiley. New York.
- Reeve, M.J., Hall, G.G.M., Bullock, P., 1980. The effect of soil composition and environmental factors on the shrinkage of some clayey British soils. *J. Soil Sci.* 31, 429–442.
- Rocca, R; Redolfi, E; Terzariol, R. 2006. Características Geotécnicas de los Loess en Argentina.
- Ross, G.J., 1978. Relationships of specific surface area and clay content to shrink–swell potential of soils having different clay mineralogical compositions. *Can. J. Soil Sci.* 58, 159– 166.
- Rotz, C. A., Buckmaster, D. R. and J. W. Comerford. 2005. A beef herd model for simulating feed intake, animal performance, and manure excretion in farm system. *Journal Animal Science*, 83:231-242.
- Salahedin, M. 2013. Impacts of organic carbon on consistency limits in different soil textures. *Inter. J. Agric. Crop Sci.* 5(12):1381-1388.
- Seed, H.B., Woodward, R.J., Lundgren, R., 1962. Prediction of swelling potential for compacted clays,” *Soil Mech. Found. Div.*, vol. 88, no. 3, pp. 53–87.

- Seybold, C. A.; Elrashidi, M. A. and Engel, R. J. 2008. Linear regression models to estimate soil liquid limit and plasticity index from basic soil properties. *Soil Sci.* 173(1):25-34.
- Smith, G. N. 1979. *Elements of soil mechanics for civil and mining engineers.* Granada. 424 p.
- Smith, C.W., Hadas, A., Dan, J., Koyumdjisky, H., 1985. Shrinkage and Atterberg limits in relation to other properties of principal soil types in Israel. *Geoderma.* 35, 47–65.
- Stanciu A., Lungu I., Ciobanita L., Aniculaesi M. 2011. A new concept to identify and characterize active clays, *Proc. of the XVth European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Athens, Greece.*
- Sowers, G. B. y Sowers, G. F. 1994. *Introducción a la mecánica de suelos y cimentaciones,* Limusa México.
- Stanchi, S.; Oberto. E.; Freppaz M. and Zanini, E. 2009. Linear regression models for liquid and plastic limit estimation in Alpine soils. *Agrochimica.* 53(5):322-338.
- Streck, A. N. y M. C. Alberto. 2006. Simulacao do impacto da mudanca climática sobre a água disponível do solo em agroecossistemas de trigo, soja e milho em Santa Maria, RS. *Ciencia Rural,* 36: 424-433.
- Sumner, ME y Miller, WP. 1996. Capacidad de intercambio catiónico y coeficientes de intercambio. En: Sparks, DL, Ed., *Methods of Soil Analysis Part 3: Chemical Methods, SSSA Book Series 5, Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin,* 1201-1230.
- Tarbut, E. y F. Lutgens. 1999. *Ciencias de la tierra: Una introducción a la Geología Física.* 6ª. Ed. Prentice Hall Iberia S. R. L. Madrid. 572 p.
- Thomas, PJ; JC Baker & LW Zelazny. 2000. An expansive soil index for predicting shrink-swell potential. *Soil Sci. Soc. Am J.* 64 :268-274.
- Tófaló, O.R., Orgeira, M.J., Compagnucci, R., Alonso, M.S. y Ramos A. 2011. Characterization of a loess-paleosols section including a new record of the Last Interglacial in Pampean Plain, Argentina. *Journal of South American Earth Science,* 31(1):81-92.
- Tubiello, F.N. y F. Ewert. 2002. Simulating the effects of elevated CO₂ on crops: approaches and applications for climate change. *European J. Agron.*
- USDA. 1999. *Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys*". Segunda edición, págs. 869. Disponible en: <http://soils.usda.gov/technical/classification/taxonomy/>
- Van der Merwe, D.M. 1964. The prediction of heave from the plasticity index and percentage clay fraction of soils. *The Civil Engineer in South Africa,* 6(6): 103–107.
- Williams, D; T Cook., W Lynn. 1996. Evaluating the field morphology of Vertisols. *Soil Surv. Horiz.* 37: 123-131.

- Williams, J; RE Prebble; WT Williams & CT Hignett. 1983. The influence of texture, structure and clay mineralogy on the soil moisture characteristic.
- Walkley, A., Black, I.A. 1934. An examination of the method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil science*. 37: 29-38.
- Warren, F. 1985. *Física de Suelos. Manual de laboratorio*. San José, Costa Rica: IICA.
- Warrick AW. 2002. *Soil physics companion*. (ed.). CRC Press LLC. Boca Raton, London, New York Washington, D.C.
- Webster, A. 2000. *Estadística Aplicada a los Negocios y la Economía*. Bogotá, Colombia: McGraw-Hill.
- Widjaja, B. & Kurniawan, K. 2020. Conf. PIO Ser: Mater. Sci. Eng. 1007 012102
- Yilmaz, I. 2004. Relationships between liquid limit, cation exchange capacity, and swelling potentials of clayey soils. Cumhuriyet University, Faculty of Engineering, Department of Geology, 58140 Sivas, Turkey.
- Yule, D.F., Ritchie, J.T., 1980. Soil shrinkage relationships of Texas vertisols: 1 small cores. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 1285– 1291.
- Zárate, M. 2003. Loess of southern South Ame-rica *Quaternary Science Reviews* 22: 1987-2006.

10. Anexos

10.1. Anexo 1: Límites de Atterberg y porcentaje de partícula de los suelos estudiados.

Tabla 8. Límites de Atterberg y porcentaje de partícula de los suelos estudiados.

Muestras de suelo		Límites de Atterberg				Porcentaje de partícula		
Muestra	Ubicación	LL	LP	IP	MO	Arcilla	Limo	Arena
1	Castelar	0,35	0,23	0,12	2,96	24,6	49,3	26,1
2	Castelar	0,44	0,26	0,18	3,94	29,7	48,9	21,4
3	Castelar	0,37	0,24	0,13	3,68	29	49,9	21,1
4	Chivilcoy	0,35	0,28	0,07	6,07	18,9	48,1	33
5	Luján	0,35	0,27	0,08	5,17	17,9	70,2	11,9
6	San Pedro	0,35	0,12	0,23	4,29	24,4	65,8	9,8
7	Arminda	0,31	0,27	0,04	3,77	14	79	6,9
8	Oliveros	0,4	0,29	0,11	4,34	21,1	75,6	3,3
9	Bengolea	0,28	0,21	0,07	3,45	13,8	29,3	56,8
10	Bengolea	0,22	0,16	0,06	2,41	11,8	32	56,2
11	Bengolea	0,22	0,16	0,06	1,72	11,6	31,8	56,7
12	Chivilcoy	0,39	0,3	0,09	6,38	22,6	60,8	16,6
13	Chivilcoy	0,36	0,24	0,12	3,79	24,6	58,1	17,3
14	Chivilcoy	0,28	0,23	0,05	3,1	20,2	62,3	17,4
15	Pergamino	0,37	0,24	0,13	5,52	21,8	62,3	15,9
16	Pergamino	0,31	0,23	0,08	3,44	22,8	60,2	16,9
17	Pergamino	0,3	0,22	0,08	3,45	21,1	64,3	14,6
18	Entre Ríos	0,57	0,28	0,29	5,86	41,6	56,7	1,7
19	Entre Ríos	0,61	0,31	0,3	5,17	47,3	51,1	1,6
20	Entre Ríos	0,48	0,26	0,22	3,79	40,2	57,8	2
21	Entre Ríos	0,38	0,24	0,14	4,19	31,47	63,68	4,85
22	Entre Ríos	0,4	0,26	0,14	5	41,46	56,28	2,26
23	Entre Ríos	0,38	0,24	0,14	3,82	34,05	60,18	5,77
24	Entre Ríos	0,44	0,26	0,18	3,4	33,54	62,85	3,61
25	Entre Ríos	0,38	0,24	0,14	4,21	35,03	60,91	4,06
26	Entre Ríos	0,42	0,28	0,14	5,52	40,08	52,41	7,52
27	Entre Ríos	0,38	0,23	0,15	2,33	38,12	55,12	6,76
28	Entre Ríos	0,41	0,25	0,16	2,86	43,92	50,84	5,24
29	Entre Ríos	0,39	0,24	0,15	2,23	39,27	53,95	6,78
30	Entre Ríos	0,42	0,28	0,14	2,59	43,35	51,09	5,56
31	Entre Ríos	0,39	0,22	0,17	2,05	36,87	58,71	4,42
32	San Pedro	0,36	0,25	0,11	2,18	27	60	14
33	San Pedro	0,37	0,29	0,08	3,32	24	65	11
34	San Pedro	0,35	0,28	0,07	3,77	23	61	16
35	San Pedro	0,41	0,29	0,12	3,15	27	58	15
36	San Pedro	0,38	0,3	0,08	3,08	27	63	11
37	San Pedro	0,28	0,23	0,05	2,7	24	62	13
38	San Pedro	0,4	0,26	0,14	2,58	33	63	5

39	San Pedro	0,4	0,3	0,1	2,75	27	62	11
40	San Pedro	0,29	0,21	0,08	3,82	24	64	12
41	San Pedro	0,37	0,27	0,1	3,08	27	60	13
42	San Pedro	0,39	0,29	0,1	4,2	32	60	8
43	San Pedro	0,41	0,29	0,12	3,8	32	57	11

10.2. Anexo 2: Valores de CIC y COLE en los suelos estudiados.

Tabla 9. Valores de CIC y COLE en los suelos estudiados.

Muestras de suelo			
Muestra	Ubicación	CIC	COLE
1	Castelar	20,5	0,037
2	Castelar	22,6	0,027
3	Castelar	24,3	0,041
4	Chivilcoy	32,7	0,065
5	Luján	19,9	0,016
6	San Pedro	23,46	0,036
7	Arminda	19,04	0,026
8	Oliveros	20,06	0,026
9	Bengolea	12,7	0,042
10	Bengolea	14,1	0,064
11	Bengolea	13,4	0,042
12	Chivilcoy	26,8	0,079
13	Chivilcoy	23,3	0,092
14	Chivilcoy	21,2	0,063
15	Pergamino	18,9	0,088
16	Pergamino	17,1	0,084
17	Pergamino	18	0,061
18	Entre Ríos	39,1	0,170
19	Entre Ríos	41,1	0,216
20	Entre Ríos	31,7	0,156
21	Entre Ríos	27,4	0,138
22	Entre Ríos	35,0	0,126
23	Entre Ríos	28,0	0,124
24	Entre Ríos	26,7	0,135
25	Entre Ríos	29,5	0,145
26	Entre Ríos	35,4	0,138
27	Entre Ríos	26,8	0,114
28	Entre Ríos	31,4	0,123
29	Entre Ríos	27,2	0,112
30	Entre Ríos	30,4	0,111
31	Entre Ríos	25,5	0,115
32	San Pedro	20,1	0,040

33	San Pedro	21,1	0,044
34	San Pedro	21,6	0,039
35	San Pedro	22,4	0,038
36	San Pedro	22,2	0,065
37	San Pedro	19,6	0,040
38	San Pedro	24,5	0,087
39	San Pedro	21,5	0,028
40	San Pedro	22,3	0,049
41	San Pedro	22,2	0,018
42	San Pedro	27,7	0,022
43	San Pedro	26,8	0,097

10.3. Anexo 3: Clasificación de la expansividad con los métodos indirectos

Tabla 10. Clasificación de la expansividad con son los métodos indirectos utilizados.

Muestras de suelo		Métodos indirectos de clasificación de la expansividad					
Muestra	Ubicación	DR	Ch	Yz	Th	VM	S
1	Castelar	B	B	B	M	M	M
2	Castelar	M	M	B	B	M	M
3	Castelar	M	M	B	M	M	M
4	Chivilcoy	B	B	M	M	B	B
5	Luján	B	B	B	B	B	B
6	San Pedro	B	M	B	M	A	A
7	Arminda	B	B	B	B	B	B
8	Oliveros	M	B	B	B	B	B
9	Bengolea	B	B	B	M	B	B
10	Bengolea	B	B	B	A	B	B
11	Bengolea	B	B	B	M	B	B
12	Chivilcoy	M	B	B	A	B	B
13	Chivilcoy	M	M	B	A	M	B
14	Chivilcoy	B	B	B	A	B	B
15	Pergamino	M	M	B	A	M	M
16	Pergamino	B	B	B	A	B	B
17	Pergamino	B	B	B	A	B	B
18	Entre Ríos	A	A	A	MA	A	A
19	Entre Ríos	A	A	A	MA	A	A
20	Entre Ríos	M	A	M	MA	A	A
21	Entre Ríos	M	M	M	MA	M	M
22	Entre Ríos	M	M	M	MA	B	M
23	Entre Ríos	M	M	M	MA	M	M
24	Entre Ríos	M	A	B	MA	M	M
25	Entre Ríos	M	M	M	MA	M	M
26	Entre Ríos	M	M	M	MA	B	M
27	Entre Ríos	M	M	B	MA	B	M

28	Entre Ríos	M	M	M	MA	B	M
29	Entre Ríos	M	M	M	MA	B	M
30	Entre Ríos	M	M	M	MA	B	M
31	Entre Ríos	M	M	B	MA	M	M
32	San Pedro	M	M	B	M	B	M
33	San Pedro	M	B	B	M	B	B
34	San Pedro	M	B	B	M	B	B
35	San Pedro	M	M	B	M	M	M
36	San Pedro	M	B	B	A	B	B
37	San Pedro	B	B	B	M	B	B
38	San Pedro	M	M	B	A	B	M
39	San Pedro	M	B	B	B	B	B
40	San Pedro	B	B	B	M	B	B
41	San Pedro	M	B	B	B	B	B
42	San Pedro	M	M	M	B	B	B
43	San Pedro	M	M	B	MA	B	M

Leyenda: DR= Dakshanamurthy y Raman; Ch= Chen; Yz= Yilmaz; Th= Thomas; VM= Van der Merwes; S= Seed.

Niveles de clasificación: B= Bajo; M= Medio; A= Alto; MA= Muy alto.