



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

**Friabilidad de los suelos: Influencia de la mineralogía de la fracción arcilla y su relación con otras propiedades edáficas. Estudio de caso: Suelos cultivados en caña de azúcar del Valle del Cauca (Colombia)**

**Edgar Álvaro Ávila Pedraza**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ciencias Agrarias  
Bogotá D.C., Colombia  
2015

II

Friabilidad de los suelos: Influencia de la mineralogía de la fracción arcilla y su relación con otras propiedades edáficas. Estudio de caso: Suelos cultivados en caña de azúcar del Valle del Cauca (Colombia)

---

# **Friabilidad de los suelos: influencia de la mineralogía de la fracción arcilla y su relación con otras propiedades edáficas. Estudio de caso: suelos cultivados en caña de azúcar del Valle del Cauca (Colombia)**

**Edgar Álvaro Ávila Pedraza**

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:  
**Doctor en Ciencias Agrarias**

Director:

Ingeniero Agrónomo Ph.D. Raúl Madriñán Molina

Codirector:

Ingeniero Agrícola Ph.D. Fabio Rodrigo Leiva Barón

Línea de Investigación:

Suelos y Aguas

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Agrarias

Bogotá D.C., Colombia

2015



*A mi esposa Silvia y mis hijos Edgar Andrés,  
Laura Valentina y Luisa Fernanda.*



# Agradecimientos

A Edgar Andrés, Laura Valentina y Silvia por aceptar los sacrificios que implica tener un padre y esposo realizando una actividad académica como esta.

A mis padres Bertha y Álvaro y a mi suegra Ana Silvia por su apoyo continuo e incondicional.

Al profesor Raúl Madriñán Molina quien siempre me ha apoyado y orientado incondicionalmente. A él debo mucho de esta meta cumplida.

Al profesor Fabio Rodrigo Leiva, persona y docente íntegro quien también me orientó académicamente en este proceso y de quien aprendí aspectos que me ayudarán a ser un mejor docente.

Al profesor Enrique Darghan por su apoyo y orientación en el análisis estadístico.

A la Universidad del Tolima por haberme otorgado la comisión de estudios y el apoyo económico para la realización del doctorado.

A CENICAÑA por facilitar los contactos e ingresos a las fincas donde se realizó la toma de muestras de los suelos estudiados, y el aporte de información.

Al Instituto Geográfico Agustín Codazzi por haber facilitado las instalaciones del Laboratorio Nacional de Suelos para la realización de la fase experimental del proyecto, en especial a su director Jorge Alberto Sánchez y al equipo humano de las áreas de preparación de muestras, Mineralogía y Física de Suelos, esta última en cabeza del ingeniero Agrícola Jaime Álvarez.

A La Universidad Nacional de Colombia (sedes Bogotá y Palmira) por la excelente formación académica y personal que recibí en sus claustros y por el apoyo económico y técnico recibido.

A COLCIENCIAS por el financiamiento de las fases de campo y laboratorio del proyecto.

VIII Friabilidad de los suelos: Influencia de la mineralogía de la fracción arcilla y su relación con otras propiedades edáficas. Estudio de caso: Suelos cultivados en caña de azúcar del Valle del Cauca (Colombia)

---

## Resumen

La friabilidad es una propiedad dinámica y determinante en la respuesta físico-mecánica del suelo a la labranza y resulta esencial en la obtención de una adecuada cama de siembra para los cultivos. Su comportamiento se ha asociado a la naturaleza de otras propiedades edáficas y al contenido de agua, por lo tanto, requiere ser estudiada de manera integral con las diferentes propiedades físicas, químicas y mineralógicas del suelo. En Colombia no se han reportado estudios que evalúen cuantitativamente la friabilidad de los suelos, por lo que el presente trabajo constituye un estudio piloto en este tópico. El objetivo general de esta investigación fue evaluar la influencia de la mineralogía de la fracción arcilla y otras propiedades edáficas en la friabilidad de suelos cultivados en caña de azúcar. Por su parte, los objetivos específicos fueron i) determinar el efecto del tamaño de los agregados y la diferenciación de los horizontes superficiales en el índice de friabilidad de los suelos, usando el coeficiente de variación multivariante, ii) evaluar el efecto del dominio de los minerales arcillosos tipo 1: 1 (caolinitas) y 2:1 (esmeclitas y vermiculitas), la textura y el contenido de carbono orgánico en el índice de friabilidad de los suelos, iii) evaluar la relación de la friabilidad con diferentes propiedades físicas y químicas de los suelos, y iv) Evaluar el contenido de agua en el que suelos cultivados en caña de azúcar adquieren su condición de óptima (máxima) friabilidad y su relación con el límite plástico. Se destaca que el estudio se llevó a cabo en 18 fincas localizadas en el centro y sur del departamento del Valle del Cauca y norte del departamento del Cauca (Colombia), realizando muestreos de suelos en los dos primeros horizontes (Ap y A1) de 91 sitios de observación. Se estimó el índice de friabilidad (IF) a 9840 agregados recolectados, utilizando el método de resistencia al rompimiento; los agregados fueron obtenidos de 182 bloques de suelo, posteriormente secados en invernadero y en horno a baja temperatura (40°C), segregados en cuatro tamaños y finalmente sometidos a compresión para determinar su resistencia al rompimiento. Este importante volumen de muestras fue un aspecto fundamental para la confiabilidad de los resultados encontrados. Los horizontes del perfil de suelo se caracterizaron en campo según la descripción morfológica y en el laboratorio se determinaron las propiedades: físicas (densidad aparente, textura, límites de Atterberg, diámetro ponderado medio de los agregados, estado de agregación y los contenidos de agua de los agregados a diferentes potenciales de presión: -10, -30, -100 y -300 kPa); químicas (carbono orgánico, pH y conductividad eléctrica) y mineralógicas (tipos de arcillas). El análisis estadístico se realizó a partir de un enfoque descriptivo e inferencial usando métodos univariantes y multivariantes. El estudio mostró variación del IF con el tamaño de los agregados y horizontes superficiales, y un valor más conveniente del mismo utilizando el coeficiente de variación multivariante, a partir del cual se estimó el límite inferior del coeficiente de variación ( $IF_i$ ) como el valor más representativo del IF; de otro lado, no se encontró efecto con nivel de significancia del diámetro ponderado medio de los agregados estables al agua, de la densidad aparente, del pH ni de la conductividad eléctrica en el  $IF_i$ . No obstante, el estado de agregación y la porosidad total del suelo mostraron efecto significativo en el  $IF_i$ . En este trabajo no se encontró efecto significativo de la dominancia de arcillas 1:1 y

2:1 cuando la variable respuesta fue el  $IF_i$ , pero si una tendencia (desde el punto de vista descriptivo) a presentar mayor  $IF_i$  los suelos con dominio de arcillas 1:1; por el contrario, la fracción de arena total del suelo y el contenido de carbono orgánico (CO) presentaron efecto altamente significativo, encontrando que los suelos fueron más friables con los mayores contenidos de CO y los menores contenidos de la fracción de arena total. Mediante modelo estadístico-matemático se estimó la máxima friabilidad en el horizonte Ap de los suelos en un valor del  $IF_i$  de 0.498 y en el horizonte A1 en un valor del  $IF_i$  de 0.410; estos valores de máxima friabilidad se asociaron a contenidos de agua de 332.04 y 279.89 g kg<sup>-1</sup> respectivamente y se correspondieron con potenciales de presión de -78.62 y -30.08 kPa. A partir de análisis de correlación canónica que incluyeron las variables:  $IF_i$ , potenciales de presión (T), retención de agua (RA) y contenido de agua obtenido experimentalmente en el LP, se generó un modelo estadístico que permitió estimar el contenido de agua en el LP (ALP) para los suelos en su condición de máxima (óptima) friabilidad, tanto en Ap como en A1. Se encontró que el contenido de agua en el que se obtuvo la máxima (óptima) friabilidad fue muy cercano (por debajo) a aquel donde los suelos adquirieron el límite plástico (estimado por modelo); este contenido de agua en el que se obtuvo la máxima friabilidad estuvo en el rango entre 0.88\*ALP (horizonte Ap) y 0.91\*ALP (horizonte A1). De otra parte, se encontró que el  $IF_i$  fue mayor en algunos suelos en los que se encontró desarrollo de microestructura (bloques subangulares) en relación con aquellos que carecieron de la misma (masiva), confirmando la relación positiva entre desarrollo de microestructura y el  $IF_i$ . Los resultados de esta investigación constituyen información inédita en el país, encaminada a mejorar la sostenibilidad de la producción agrícola y evitar el deterioro de la calidad del suelo a partir del conocimiento de la friabilidad y su relación con diferentes propiedades del suelo. Este propósito obedece a la necesidad de lograr la reducción del gasto de energía, consumo de combustible y emisión de gases efecto invernadero (GEI) asociados a las operaciones de labranza.

**Palabras clave:** índice de friabilidad, agregados del suelo, labranza, resistencia al rompimiento, capa arable, calidad física del suelo.

## Abstract

Friability is a dynamic property that is determinant for the physical-mechanical response of soils for tillage and, therefore, is essential for creating a suitable medium for crops. Its behavior has been associated with the nature of other soil properties and moisture content; therefore, it needs to be studied in an integrated way with different physical, chemical, and mineralogical properties of soils. In Colombia, no studies have quantitatively evaluated the friability of soils, which is why the present study established a pilot study for this topic. The general objective of this research was to evaluate the influence of the mineralogy of the clay fraction and other soil properties on the friability of soils cultivated with sugar cane. The specific objectives included i) determining the effect of the size of the aggregates and differentiation of the superficial horizons on the friability index of the soils using the multivariate coefficient of variation, ii) evaluating the effect from the predominance of clay mineral types 1:1 and 2:1, texture, and organic carbon content on the soil friability index, iii) evaluating the relationship between the friability and different physical and chemical properties of the soils, and iv) evaluating the soil water content at which the soils cultivated with sugar cane obtained the optimal conditions (maximum) of friability and its relationship with the plastic limit. This study was carried out on 18 farms located in the central and southern regions of the Valle del Cauca Department and in the northern region of the Cauca Department (Colombia), taking soil samples of the first two horizons (Ap and A1) at 91 observation sites. Friability index (FI) was estimated for 9840 collected aggregates using the tensile strength method. The aggregates were obtained from 182 soil blocks, which were dried in a greenhouse and low-temperature oven (40°C), separated into four sizes and, finally, subjected to compression to determine their tensile strength. This significant sample volume was fundamental to the reliability of the results. The horizons of the soil profile were characterized in the field according to the morphological description, and the following properties were determined: physical (bulk density, texture, Atterberg limit, the mean weight diameter of aggregates, aggregation state, and water content of the aggregates at different matric potentials: -10, -30, -100 and -300 kPa); chemical (organic carbon, pH, and electric conductivity) and mineralogical (clay type). The statistical analysis was carried out with an inferential and descriptive focus using multivariate and univariate methods. This study showed an FI variation related to the size of the aggregates and the surface horizons and a more relevant FI value using the multivariate coefficient of variation, from which the lower limit of the coefficient of variation ( $FI_i$ ) was estimated as the most representative value of the FI. On the other hand, the mean weight diameter of the aggregates, the bulk density, the pH, and the electric conductivity did not have an effect at a significant level on the  $FI_i$ . Nevertheless, the aggregation state and the total porosity of the soils demonstrated a significant effect on the  $FI_i$ . This study did not show a significant effect from the 1:1 and 2:1

clay predominance when the response variable was the  $FI_i$ , but there was a tendency (from the descriptive point of view) to show a higher  $FI_i$  in the soils with a 1:1 clay predominance. However, the total sand fraction of the soil and organic carbon (OC) content show highly significant effects, with soils that were friable with the higher OC contents and lower contents for the total sand fraction. A statistical-mathematical model was used to estimate the maximum friability of the Ap horizon at a  $FI_i$  value of 0.498 and at a  $FI_i$  value of 0.410 for the A1 horizon. These maximum friability values were associated with water contents of 332.04 and 279.89 g kg<sup>-1</sup>, respectively, and corresponded to matric potentials of -78.62 and -30.08 kPa, respectively. A statistical model was generated from the canonical correlation analysis, which included the variables  $FI_i$ , matric potential (P), water retention (WR) and water content experimentally obtained in the PL, that facilitated an estimation of the water content in the PL (MPL) of the soils at their maximum (optimal) friability for both Ap and A1. The results showed that the water content that resulted in the maximum (optimal) friability was very close (below) to the moisture their content that resulted in the plastic limit of the soils (as estimated by the model); the water content from which the maximum friability was obtained demonstrated a range of 0.88\* MPL (Ap horizon) to 0.91\* MPL (A1 horizon). Finally, the  $FI_i$  was higher in some soils that had microstructural development (subangular blocky) than in soils that lacked them (massive), confirming the positive relationship between microstructural development and the  $FI_i$ . This study provided unpublished information for the country, aimed at improving sustainability for agricultural production and avoiding the deterioration of soil quality with knowledge on friability and its relationship with different soil properties; goals that are rooted in the need to reduce the energy use, consumption of combustibles, and emissions of greenhouse gases (GHG) that are associated with farming operations.

**Keywords:** friability index, soil aggregates, farming, tensile strength, topsoil, physical quality of soils.

# Contenido

	Pág.
<b>Resumen.....</b>	<b>IX</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>XI</b>
<b>Lista de figuras .....</b>	<b>XV</b>
<b>Lista de tablas.....</b>	<b>XVII</b>
<b>Introducción.....</b>	<b>1</b>
<b>Capítulo 1. Determinación de la friabilidad del suelo: Una revisión de sus principales métodos de estimación con énfasis en la determinación cuantitativa de la resistencia al rompimiento.....</b>	<b>9</b>
1.1 Resumen .....	9
1.2 Abstract.....	10
1.3 Introducción.....	10
1.4 Métodos para determinar la friabilidad del suelo.....	11
1.4.1 Métodos cualitativos.....	13
1.4.2 Métodos semicuantitativos.....	16
1.4.3 Métodos cuantitativos.....	17
1.5 Conclusiones .....	26
1.6 Referencias .....	26
<b>Capítulo 2. Efecto del tamaño de los agregados y la diferenciación de horizontes superficiales en el índice de friabilidad de suelos cultivados en caña de azúcar: Un enfoque multivariante.....</b>	<b>31</b>
2.1 Resumen .....	31
2.2 Abstract.....	32
2.3 Introducción.....	32
2.4 Materiales y métodos .....	34
2.4.1 Descripción del área donde se localizaron los sitios de muestreo.....	34
2.4.2 Distribución de sitios de observación y tipos de suelos.....	34
2.4.3 Separación de los agregados de suelo.....	34
2.4.4 Determinación del índice de friabilidad.....	35
2.4.5 Análisis estadístico .....	36
2.5 Resultados y discusión.....	37
2.6 Conclusiones .....	43
2.7 Agradecimientos.....	44
2.8 Referencias .....	44
<b>Capítulo 3. Influencia de la mineralogía de arcillas, textura y contenido de carbono orgánico en el índice de friabilidad de suelos cultivados en caña de azúcar.....</b>	<b>47</b>
3.1 Resumen .....	47
3.2 Abstract.....	48
3.3 Introducción.....	49
3.4 Materiales y métodos .....	50
3.4.1 Localización y características del área donde se localizaron los sitios de muestreo.....	50
3.4.2 Tipos de suelos y su localización en el paisaje.....	51
3.4.3 Muestreo de suelos.....	53

3.4.4 Preparación de las muestras de suelo para las pruebas de compresión.....	53
3.4.5 Determinación de la resistencia al rompimiento e índice de friabilidad .....	53
3.4.6 Separación de las fracciones arcilla, limo y arena.....	54
3.4.7 Análisis de arcillas por difracción de rayos X y determinación del carbono orgánico....	54
3.4.8 Análisis estadístico .....	55
3.5 Resultados y discusión .....	55
3.6 Conclusiones .....	61
3.7 Agradecimientos .....	62
3.8 Referencias .....	62
<b>Capítulo 4. Relación de la friabilidad con diferentes propiedades físicas y químicas de los suelos bajo cultivo de caña de azúcar en sectores del Valle Geográfico del Río Cauca, Colombia.....</b>	<b>65</b>
4.1 Resumen .....	65
4.2 Abstract .....	66
4.3 Introducción.....	66
4.4 Materiales y métodos .....	68
4.4.1 Sitios de muestreo .....	68
4.4.2 Toma y preparación de muestras.....	69
4.4.3 Determinación de la resistencia al rompimiento e índice de friabilidad .....	70
4.4.4 Determinaciones físicas y químicas de los suelos.....	71
4.4.5 Preparación de secciones delgadas y Microscopía electrónica de barrido (SEM) .....	72
4.4.6 Análisis estadístico .....	72
4.5 Resultados y discusión .....	73
4.6 Conclusiones .....	79
4.7 Agradecimientos .....	80
4.8 Referencias .....	80
<b>Capítulo 5. Friabilidad y su relación con el contenido de agua y el límite plástico en suelos dedicados al cultivo de caña de azúcar.....</b>	<b>85</b>
5.1 Resumen .....	85
5.2 Abstract.....	86
5.3 Introducción.....	87
5.4 Materiales y métodos .....	88
5.4.1 Sitios de observación y recolección de muestras de suelo .....	88
5.4.2 Saturación de los agregados con agua y posterior extracción a diferentes potenciales de presión .....	88
5.4.3 Estimación del índice de friabilidad a diferentes contenidos de agua del suelo.....	89
5.4.4. Determinación del límite plástico de los suelos.....	90
5.4.5. Principales características de los suelos estudiados .....	90
5.4.6 Análisis estadístico .....	91
5.5 Resultados y discusión .....	91
5.6 Conclusiones .....	96
5.7 Agradecimientos .....	97
5.8 Referencias .....	97
<b>6. Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>101</b>
<b>Anexos:.....</b>	<b>105</b>

## Lista de figuras

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1-1:</b> Principales métodos utilizados para evaluar la friabilidad del suelo.	12
<b>Figura 1-2:</b> Determinación de la friabilidad del suelo de manera manual. A Partir de USDA (2002).	13
<b>Figura 1-3:</b> Esquema representativo del método de rompimiento del suelo por caída.	16
<b>Figura 1-4:</b> Esquema de agregado de suelo en la prueba de resistencia a la tensión. A partir de Dexter y Watts (2001).	18
<b>Figura 1-5:</b> Esquema de agregado de suelo sometido a rompimiento en el ensayo de resistencia a la compresión. A partir de Dexter y Watts (2001).	18
<b>Figura 1-6:</b> Determinación de la resistencia del suelo a la compresión.	20
<b>Figura 1-7:</b> Efecto de la forma de los agregados sobre la determinación de la resistencia a la compresión: (A) agregados de forma esférica, (B) agregados de superficie de contacto plana y (C) agregados de forma irregular (a partir de Seben et al., 2013).	23
<b>Figura 1-8:</b> Transformador diferencial lineal variable (esquema general) para prueba de friabilidad. A partir de Snyder et al. (1995).	23
<b>Figura 1-9:</b> Punto de inflexión de la curva de retención de agua del suelo (máximo valor de S).	24
<b>Figura 2-1:</b> Distribución del $IF_m$ por horizonte para los diferentes rangos de tamaño de agregados.	38
<b>Figura 2-2:</b> Distribución de la RR por horizonte para los diferentes rangos de tamaño de agregados.	38
<b>Figura 2-3:</b> Índice de friabilidad medio ( $IF_m$ ) por horizonte para los diferentes rangos de tamaño de agregados.	39
<b>Figura 2-4:</b> Distribución del $IF_i$ para cada horizonte en los diferentes rangos de tamaño de agregados.	40
<b>Figura 2-5:</b> Valores del $IF_i$ de los órdenes taxonómicos de suelos bajo estudio.	43

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 3-1:</b> Localización de las fincas donde se realizó el muestreo de suelos (CENICAÑA, 2014).	51
<b>Figura 3-2:</b> Clases texturales de los horizontes Ap y A1 de los suelos bajo estudio.	54
<b>Figura 3-3:</b> Diagrama tridimensional de los pesos de los componentes extraídos del análisis de componentes principales para las variables minerales de la fracción arcilla.	56
<b>Figura 3-4:</b> Análisis de perfiles del $IF_i$ por tipo de dominio arcilloso y tamaño de los agregados. (Las barras en cada perfil indican el error estándar de la media del $IF_i$ ; uno positivo y uno negativo solo para evitar el solapamiento de las barras).	57
<b>Figura 3-5:</b> Relación de las variables carbono orgánico (CO), fracción arena total (FAT) e índice de friabilidad en su límite inferior ( $IF_i$ ), utilizando el método spline.	60
<b>Figura 4-1:</b> Relación de las variables densidad aparente ( $D_a$ ), porosidad total (Pt) e índice de friabilidad en su límite inferior ( $IF_i$ ), por el método spline.	75
<b>Figura 4-2:</b> Relación de las variables diámetro ponderado medio (DPM), estado de agregación (Ea) e índice de friabilidad en su límite inferior ( $IF_i$ ), obtenida por el método spline.	77
<b>Figura 4-3:</b> Secciones delgadas de algunos de los horizontes Ap (NP:1.25 x10). A) Udertic Haplustalfs ( $IF_i$ : 0.46), B) Typic Haplustepts ( $IF_i$ : 0.52), C) Typic Calciusterts ( $IF_i$ : 0.45), D) Vertic Haplustalfs ( $IF_i$ : 0.37), E) Petrocalcic Haplusterts ( $IF_i$ : 0.30), F) Entic Haplusterts ( $IF_i$ : 0.26).	78
<b>Figura 4-4:</b> Microagregados de la fracción de suelo < 2mm observados por SEM: A) microagregado de suelo con dominio de arcillas tipo 2:1 y B) microagregado de suelo con dominio de arcilla tipo 1:1.	79
<b>Figura 5-1:</b> Relación del índice de friabilidad en su límite inferior ( $IF_i$ ), potencial de presión (T) y retención de agua (RA) a cada potencial de presión para los horizontes Ap y A1, obtenida mediante superficies cuadráticas.	92
<b>Figura 5-2:</b> Diagrama del primer conjunto de variables canónicas y sus correlaciones canónicas.	93
<b>Figura 5-3:</b> Diagrama del segundo conjunto de variables canónicas y sus correlaciones canónicas.	94
<b>Figura 5-4:</b> Diagrama de dispersión para las variables canónicas del primer modelo de correlación.	94

## Lista de tablas

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1-1:</b> Categorías consideradas en la clasificación de la consistencia del suelo en húmedo (USDA, 2002).	13
<b>Tabla 1-2:</b> Clasificación de la consistencia del suelo en húmedo (FAO, 2009).	14
<b>Tabla 1-3:</b> Clasificación de la friabilidad del suelo basada en la evaluación visual de la estructura (Ball et al., 2007).	15
<b>Tabla 1-4:</b> Interpretación del índice de friabilidad estimado mediante el coeficiente de variación (Imhoff et al., 2002).	22
<b>Tabla 2-1:</b> Clasificación de los suelos según el índice de friabilidad (IF) (a partir de los planteamientos hechos por Imhoff et al., 2002 y Macks et al., 1996).	36
<b>Tabla 2-2:</b> Promedios del $IF_m$ por horizonte y rangos de tamaño de agregado para los suelos bajo estudio.	37
<b>Tabla 2-3:</b> Índice de friabilidad multivariante y univariante en sus medidas inferior ( $IF_i$ ), media ( $IF_m$ ) y superior ( $IF_s$ ), segregado por horizonte para los suelos bajo estudio.	40
<b>Tabla 2-4:</b> Índice de friabilidad multivariante y univariante en sus medidas inferior ( $IF_i$ ), media ( $IF_m$ ) y superior ( $IF_s$ ), segregado por tamaño de agregados en cada horizonte para los suelos bajo estudio.	40
<b>Tabla 2-5:</b> Modelos para el $IF_i$ de cada horizonte, coeficiente de determinación y razón de cambio por tamaño de agregado.	41
<b>Tabla 2-6:</b> Resistencia al rompimiento (kPa) de los diferentes tamaños de agregados para cada orden de suelo.	43
<b>Tabla 3-1:</b> Principales propiedades de los suelos bajo estudio.	52
<b>Tabla 3-2:</b> Análisis de covarianza para el diseño anidado en tres etapas.	56
<b>Tabla 3-3:</b> Distribución de los promedios (celda superior) y el coeficiente de variación (celda inferior) del $IF_i$ por horizonte, textura y tamaño del agregado.	58

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 3-4:</b> Distribución de los promedios de CO (g Kg <sup>-1</sup> ) (valor superior) y FAT (%) (valor inferior) por horizonte y textura.	59
<b>Tabla 3-5:</b> Promedios generales de los contenidos de FaT, FAT y CO de los horizontes Ap y A1.	60
<b>Tabla 3-6:</b> Clasificación de los suelos según el índice de friabilidad (IF) (Imhoff et al., 2002).	61
<b>Tabla 4-1:</b> Localización geográfica de las fincas donde se realizó el muestreo y principales propiedades físicas y químicas de los suelos.	69
<b>Tabla 4-2:</b> Análisis de covarianza multivariante para los efectos considerados en el modelo usando el estadístico Lambda de Wilks para el cálculo del valor F.	73
<b>Tabla 4-3:</b> Medias del Índice de Friabilidad (IF <sub>i</sub> ) estimadas por mínimos cuadrados por horizonte y taxonomía de orden en los diferentes tamaños de agregados.	74
<b>Tabla 4-4:</b> Índice de friabilidad en su límite inferior(IF <sub>i</sub> ), diámetro ponderado medio (DPM), pH y conductividad eléctrica (CE) en relación con la estabilidad de los suelos bajo estudio.	76
<b>Tabla 4-5:</b> Estado de agregación (Ea) e Índice de friabilidad en su límite inferior (IF <sub>i</sub> ) de los suelos estudiados (horizontes Ap y A1).	76
<b>Tabla 5-1:</b> Valores ponderados de los contenidos de arena, limo, arcilla y carbono orgánico de los suelos estudiados.	90
<b>Tabla 5-2:</b> Valores promedios ponderados de los contenidos de agua en el límite plástico y en los potenciales de presión de -10, -30, -100 y -300 kPa para los horizontes Ap y A1 de los suelos bajo estudio.	91
<b>Tabla 5-3:</b> Valores óptimos del IF <sub>i</sub> y sus puntos críticos para RA y T en los suelos estudiados.	93
<b>Tabla 5-4:</b> Correlaciones canónicas y significancia asociada.	93
<b>Tabla 5-5:</b> Análisis de redundancia canónica.	95
<b>Tabla 5-6:</b> Contenidos de agua en la máxima (óptima) friabilidad, en el límite plástico y el considerado óptimo para la labranza de los suelos estudiados.	96

# Lista de Símbolos y abreviaturas

## Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad (SI)	Definición
ALP	Contenido de agua en el límite plástico	g kg <sup>-1</sup>	Figura 5-2
A <sub>p</sub>	Horizonte superficial		
A <sub>1</sub>	Horizonte subsuperficial		
CV <sub>m</sub>	Coficiente de variación multivariante		CV <sub>m</sub> =[(ȳ <sup>T</sup> sȳ)/(ȳ <sup>T</sup> ȳ)] <sup>1/2</sup>
CV <sub>u</sub>	Coficiente de variación univariante		
D <sub>e</sub>	Diámetro efectivo de los agregados	m	Ec. 4.2
D <sub>m</sub>	Diámetro medio de los agregados	m	Ec. 4.3
D <sub>1</sub>	Diámetro medio de los agregados	m	Ec. 1.1
D <sub>2</sub>	Diámetro aritmético medio de los agregados	m	Ec. 1.2
D <sub>3</sub>	Diámetro geométrico medio de los agregados	m	Ec. 1.3
D <sub>4</sub>	Diámetro efectivo de los agregados	m	Ec. 1.4
D <sub>5</sub>			Ec. 1.5
EFI	Consistencia extremadamente firme	Cualitativo	Tabla 1-1
FR	Consistencia friable	Cualitativo	Tabla 1-1
FI	Consistencia firme	Cualitativo	Tabla 1-1
IF	Índice de friabilidad	Adimensional	IF = $\frac{\sigma_y}{\bar{Y}} \pm \frac{\sigma_y}{\bar{Y}\sqrt{2n}}$
IF <sub>i</sub>	Índice de friabilidad inferior (límite inferior del coeficiente de variación)	Adimensional	$\frac{S_y}{\bar{y}} - \frac{S_y}{\bar{y}\sqrt{2n}}$
IF <sub>m</sub>	Índice de friabilidad medio (parte media del coeficiente de variación)	Adimensional	IF <sub>i</sub> +IF <sub>s</sub> /2
IF <sub>s</sub>	Índice de friabilidad superior (límite superior del coeficiente de variación)	Adimensional	$\frac{S_y}{\bar{y}} + \frac{S_y}{\bar{y}\sqrt{2n}}$

<b>Símbolo</b>	<b>Término</b>	<b>Unidad (SI)</b>	<b>Definición</b>
LO	Consistencia suelta	Cualitativo	Tabla 1-2
LR	Consistencia ligeramente rígida	Cualitativo	Tabla 1-1
MFR	Consistencia muy friable	Cualitativo	Tabla 1-1
MFI	Consistencia muy firme	Cualitativo	Tabla 1-1
MR	Consistencia muy rígida	Cualitativo	Tabla 1-1
R	Consistencia rígida	Cualitativo	Tabla 1-1
RR	Resistencia al rompimiento	kPa	
S	Consistencia suelta	cualitativo	Tabla 1-1
S	Índice de calidad física (énfasis en calidad estructural)	Adimensional	
Sq1	Calidad de la estructura friable	Cualitativo	Tabla 1-3
Sq2	Calidad de la estructura intacta	Cualitativo	Tabla 1-3
Sq3	Calidad de la estructura firme	Cualitativo	Tabla 1-3
Sq4	Calidad de la estructura compacta	Cualitativo	Tabla 1-3
Sq5	Calidad de la estructura muy compacta	cualitativo	Tabla 1-3
T	Potencial de presión de agua	kPa	Figura 5-2
VFR	Consistencia muy friable	Cualitativo	Tabla 1-2
VFI	Consistencia muy firme	Cualitativo	Tabla 1-2

### Subíndices

<b>Subíndice</b>	<b>Término</b>
IF <sub>Ap</sub>	Índice de friabilidad horizonte Ap
IF <sub>A1</sub>	Índice de friabilidad horizonte A1

## Abreviaturas

<b>Abreviatura</b>	<b>Término</b>
ACC	Contenido de agua a capacidad de campo
ACP	Análisis de componentes principales
CO	Carbono orgánico
CE	Conductividad eléctrica
Da	Densidad aparente
DPM	Diámetro ponderado medio
DRX	Difracción de rayos x
Ea	Estado de agregación
FaT	Fracción arcilla total
FAT	Fracción arena total
FLT	Fracción limo total
GEI	Gases efecto invernadero
MO	Materia orgánica
Pt	Porosidad total
RA	Retención de agua
CAOL	Contenido de agua óptimo para la labranza

## Unidades de medida

<b>Unidad</b>	<b>Significado</b>
cm	Centímetro
HP	Caballos de fuerza o potencia
kPa	Kilopascal
mm	Milímetro
m	Metro
μm	Micrómetro o micra
N	Newton
g	Gramo
kg	Kilogramo
°C	Grados centígrados
mS/cm	Mili Siemens/centímetro



# Introducción

El desarrollo de labores agrícolas y pecuarias afecta las propiedades del suelo y por ende, su calidad; la capa arable es la que recibe la acción directa de la maquinaria agrícola, el pisoteo de ganado, el impacto de la lluvia y la escorrentía que afectan particularmente sus propiedades físicas. Dentro de estas propiedades, la friabilidad, definida como la tendencia de una masa de suelo no confinada a desmoronarse en un conjunto particular de agregados de menor tamaño debido a la tensión o la compresión aplicada (Utomo y Dexter, 1981; Dexter y Watts, 2001), juega un papel fundamental en el manejo físico-mecánico del suelo, al indicar el estado óptimo en el que se deben llevar a cabo las actividades de labranza para obtener una cama de siembra adecuada con mínimo consumo de energía (Munkholm, 2011).

La friabilidad ha sido tema de interés para los científicos desde hace varias décadas (Christensen, 1930), pero solo a partir del trabajo de Utomo y Dexter (1981), el tema pasó a ser un aspecto importante de la agenda de la ciencia del suelo. Este interés se ha intensificado recientemente a partir del nuevo enfoque de la seguridad alimentaria mundial (FAO, 2009), sumado a la necesidad de reducir el uso de combustibles fósiles y la emisión de GEI en la producción de cultivos (Munkholm, 2011). Se destaca que el uso de combustibles fósiles en la agricultura genera CO<sub>2</sub>, el principal GEI (Filipovic et al., 2006; Peeyush et al., 2013) y esta emisión ocurre principalmente durante la labranza del suelo, operación con el mayor consumo de combustible en la producción agrícola (Robertson et al., 2000). Los requerimientos de energía en esta labor dependen en gran medida del estado físico-mecánico del horizonte superficial del suelo y en particular de su friabilidad (Munkholm, 2011). Suelos con friabilidad adecuada demandan menos energía para la labranza y por consiguiente permiten ahorrar combustibles y costos asociados, así como reducir emisiones de GEI (Peeyush et al., 2013). La friabilidad, de acuerdo con Watts y Dexter (1998), es sinónimo de calidad de la condición física del suelo y una característica deseable para preparar una cama de siembra adecuada; siendo este el principal objetivo de la labranza, actividad que se lleva a cabo más fácilmente en suelos friables con terrones grandes relativamente débiles y agregados pequeños relativamente fuertes y resistentes al desmoronamiento (Dexter, 1997). Por lo tanto, la condición de óptima friabilidad al momento de la labranza es crucial en la producción del tamaño adecuado de agregados que beneficie la germinación de las semillas y el desarrollo radical (Karlen et al., 1990; Dexter y Watts, 2001), con alta eficiencia y bajo consumo de combustible.

Las investigaciones sobre friabilidad del suelo se han concentrado en países como Australia, Dinamarca y el Reino Unido, donde durante las últimas cuatro décadas se ha estudiado este tópico principalmente por el incremento de fenómenos que amenazan la calidad del suelo como la erosión, la compactación y la pérdida de materia orgánica de los suelos agrícolas (Munkholm, 2011). En el contexto Suramericano, es en Brasil donde más se han reportado estudios sobre la friabilidad en los suelos, especialmente desde la década del 2000, en los que se ha relacionado esta propiedad con la materia orgánica, la textura y la densidad aparente de

oxisoles dedicados a la actividad agrícola (Imhoff et al., 2002; Tormena et al., 2008 y Guimarães et al., 2009). En Venezuela, Hossne (2008) estudió el índice de friabilidad (IF) en Ultisoles de sabana basado en los límites de consistencia, mientras que en Argentina, Commegna et al. (2005) estudiaron el IF en la recuperación natural de la estructura de Alfisoles bajo siembra directa. En Colombia no se han reportado estudios previos de tipo cuantitativo sobre este tópico; lo más próximo a su determinación está relacionado con la descripción cualitativa de la consistencia del suelo utilizando para ello la visión y el tacto humano, lo que ha conllevado a la obtención de resultados poco confiables, difíciles de estandarizar y con escasa aplicabilidad. Este método de determinación dificulta la toma de decisiones a la hora de labrar el suelo, situación aun más compleja en suelos de texturas finas con mayor plasticidad y adhesividad, como es el caso de una buena proporción de los suelos cultivados en caña de azúcar del Valle del Cauca, escenario geográfico en el que se llevó a cabo el presente trabajo.

El Valle del Cauca es un departamento de Colombia donde se practica una actividad agrícola intensiva, especialmente relacionada con el cultivo de caña de azúcar, que se ha facilitado en gran medida por las favorables características ambientales y topográficas que lo caracterizan, especialmente en su parte plana. Esta actividad desarrollada a gran escala demanda el uso de maquinaria, que para el caso específico de los suelos de esta región, cuyos contenidos de arcillas son generalmente altos (IGAC, 2006), puede traer consecuencias desfavorables sobre su calidad si no se mecanizan bajo una condición adecuada. La necesidad de información confiable que permita aproximarse al conocimiento del momento adecuado en el que el suelo presenta su mejor condición para las operaciones de labranza, sin que sufra deterioro en su calidad física, motivó el planteamiento de la presente investigación.

Para la estimación de la friabilidad se han propuesto métodos cualitativos, semi-cuantitativos y cuantitativos (Munkholm, 2011). Los métodos cualitativos se basan en la descripción de la morfología y grado de desarrollo de la estructura, la resistencia del suelo y la consistencia en húmedo de este (USDA, 2002; Ball et al., 2007; FAO, 2009). Los métodos semi-cuantitativos aplican el impacto de caída para fragmentar una muestra de suelo y establecer características como la distribución del tamaño de los agregados, su diámetro geométrico medio o el peso del diámetro promedio (Hadas y Wolf, 1984). Para la estimación cuantitativa, comúnmente se usan pruebas de laboratorio que miden la resistencia del suelo a la tensión o compresión (Utomo y Dexter, 1981; Watts y Dexter, 1998; Dexter y Watts, 2001), utilizando esfuerzos que conducen al rompimiento de terrones o agregados naturales o remoldeados de suelo. Se han propuesto también métodos cuantitativos que permiten estimar la friabilidad de forma indirecta, como es el caso del punto de inflexión de la curva de retención de agua (factor *S*) (Dexter y Bird, 2001; Dexter, 2004a; Dexter, 2004b), la determinación del volumen de poros de tamaño mayor de 30  $\mu\text{m}$  (Guérif, 1990; Munkholm et al., 2002b) y, mediante funciones de pedotransferencia fundamentadas en la medición de otras propiedades del suelo (Macks et al., 1996).

En la presente investigación se utilizó uno de los métodos cuantitativos de mayor aceptación a nivel mundial, el método de resistencia al rompimiento (Utomo y Dexter, 1981; Watts y Dexter, 1998 y Dexter y Watts, 2001). En este método, los terrones o agregados (naturales o remoldeados) son sometidos a fuerzas de compresión, utilizando para ello un equipo de carga con dos platos paralelos entre los cuales las muestras de suelo (con un determinado contenido de agua) son comprimidas hasta el punto de ruptura. Posteriormente y a través de la determinación del coeficiente de variación de la resistencia al rompimiento, expresado a través de un intervalo de confianza, se determina el IF.

La friabilidad del suelo está relacionada con la fractura por fragilidad del suelo (Braunack et al., 1979; Dexter y Watts, 2001); por lo tanto, esta propiedad depende en gran medida de la facilidad de fractura del suelo y el desarrollo progresivo de planos de debilidad que originan grietas, y con estas, la pérdida de resistencia del mismo (Munkholm et al., 2012). La propagación de las grietas en un suelo no confinado sometido a compresión depende de la frecuencia y morfología (orientación y conectividad) de los poros y de la resistencia de los extremos de las fisuras o microgrietas (Hallett et al., 1995 a y b); en este sentido, un fuerte vínculo entre la friabilidad y la fragmentación del suelo con el espacio poroso ocupado por aire fue reportado por Munkholm et al. (2002a). De la misma forma como la friabilidad se relaciona estrechamente con la porosidad, esta propiedad ha evidenciado tener relación con otras propiedades del suelo como el tipo y cantidad de arcilla (Barzegar et al., 1995), el carbono orgánico (Watts y Dexter, 1998), la textura (Imhoff et al., 2002), la densidad aparente (Macks et al., 1996), el contenido de agua (Utomo y Dexter, 1981; Snyder et al., 1995 y Watts y Dexter, 1998), el pH y la conductividad eléctrica (Rahimi et al., 2000). Sin embargo, son escasas las investigaciones en las que se ha estudiado la relación de la friabilidad con propiedades físicas, químicas y mineralógicas en suelos del trópico.

El estudio de la friabilidad resulta complejo por ser una propiedad dinámica (Watts y Dexter, 1998), que cambia periódicamente, particularmente por su estrecha relación con el contenido de agua en el suelo (Snyder et al., 1995). Esta característica de la friabilidad ha conllevado al interrogante sobre cuál es el contenido de agua en el que los suelos alcanzan su condición de óptima friabilidad, momento en el que se considera se logra la mejor fragmentación en unidades homogéneas más pequeñas e ideales para el normal desarrollo de las semillas. Esto ha conducido a buscar su relación con los potenciales mátricos y el límite plástico de los suelos, a fin de poder establecer ese contenido de agua más adecuado para que el suelo sea labrado sin reducir su calidad física y con bajo consumo de energía.

Este trabajo constituye un esfuerzo por avanzar en el estudio de la friabilidad en los suelos del trópico y por sensibilizar a investigadores, técnicos y agricultores sobre la necesidad de continuar con el estudio de esta propiedad de los suelos en el país, para la preservación de la calidad de estos y la reducción del consumo de energía y emisiones de GEI en la producción agrícola, no solo en el Valle del Cauca, sino en otras regiones agropecuarias del territorio colombiano.

Si bien la investigación busca llamar la atención sobre la necesidad de estudiar esta propiedad física en los suelos del país, el siguiente paso debería estar encaminado a evaluar la utilización de métodos cualitativos, semicuantitativos y cuantitativos de manera conjunta, en otros cultivos y en otros tipos de suelos, para avanzar en la generación de información, a la par de proponer y validar nuevas técnicas que permitan determinar la friabilidad de los suelos con menor complejidad en el procedimiento y a menor costo que las actualmente utilizadas, pero de manera confiable.

En este contexto, el objetivo general de la presente investigación fue evaluar la influencia de la mineralogía de la fracción arcilla y otras propiedades edáficas en la friabilidad de suelos cultivados con caña de azúcar en el Valle del Cauca (Colombia).

Para el logro del objetivo general se plantearon los siguientes objetivos específicos:

Determinar el efecto del tamaño de los agregados y la diferenciación de los horizontes superficiales en el índice de friabilidad de los suelos, usando el coeficiente de variación multivariante.

Evaluar el efecto del dominio de los minerales arcillosos tipo 1: 1 y 2:1, la textura y el contenido de carbono orgánico en el índice de friabilidad de los suelos.

Evaluar la relación de la friabilidad con diferentes propiedades físicas y químicas de los suelos, y

Evaluar el contenido de agua en el que suelos cultivados con caña de azúcar adquieren su condición de óptima (máxima) friabilidad y su relación con el límite plástico.

En el presente documento se compendian los siguientes cinco capítulos (artículos):

1. Determinación de la friabilidad del suelo: Una revisión de sus principales métodos de estimación con énfasis en la determinación cuantitativa de la resistencia al rompimiento.
2. Efecto del tamaño de los agregados y la diferenciación de horizontes superficiales en el índice de friabilidad de suelos cultivados en caña de azúcar: Un enfoque multivariante.
3. Influencia de la mineralogía de arcillas, textura y contenido de carbono orgánico en el índice de friabilidad de suelos cultivados en caña de azúcar.
4. Relación de la friabilidad con diferentes propiedades físicas y químicas de los suelos bajo cultivo de caña de azúcar en sectores del Valle Geográfico del Río Cauca, Colombia.
5. Friabilidad y su relación con el contenido de agua y el límite plástico en suelos dedicados al cultivo de caña de azúcar.

---

## Referencias de la introducción

Ball, B.C., Batey, T., and Munkholm, L.J., 2007. Field assessment of soil structural quality – a development of the Peerlkamp test. *Soil Use Manage.* 23, 329-337.

Barzegar, A.R., Oades, J.M., Rengasamy, P., Murray, R.S., 1995. Tensile strength of dry, remoulded soils as affected by properties of the clay fraction. *Geoderma* 65, 93-108.

Braunack, M.V., Hewitt, J.S., and Dexter, A.R., 1979. Brittle fracture of soil aggregates and the compaction of aggregate beds. *J. Soil Sci.* 30, 653–667.

Christensen, O., 1930. An index of friability of soils. *Soil Sci.* 29, 119–138.

Commegna, M.A., Aguirre, M.E., Santamaría, R.M., 2005. Recuperación natural de la estructura en Argiudoles bajo siembra directa. *RIA*, 34 (1): 71-83.

Dexter, A.R., 1997. Physical properties of tilled soil. *Soil Till. Res.* 43, 41-63.

Dexter, A.R., 2004a. Soil physical quality Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma* 120, 201-214.

Dexter, A.R., 2004b. Soil physical quality: Part II. Friability, tillage, tith and hard-setting. *Geoderma* 120, 215–225.

Dexter, A.R., Watts, C.W., 2001. Tensile strength and friability. In: Smith, K.A., Mullins, C.E. (Eds.), *Soil and Environmental Analysis: Physical Methods*. Segunda edición. Marcel Dekker Inc, New York, pp. 405–433.

Dexter, A.R., Bird, N.R.A., 2001. Methods for predicting the optimum and the range of soil water contents for tillage based on the water retention curve. *Soil Till. Res.* 57, 203–212.

FAO., 2009. Guide for soil description. Fourth edition. Rome, pp. 49-52.

FAO., 2009. The State of Food and Agriculture., 2009. Part II. World Food and Agriculture in Review. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, pp. 103–122.

Filipovic, D.;Kosutic, S.; Gospodaric, Z.; Zimmer, R.; Banaj, D., 2006. The possibilites of fuel savings and the reduction of CO2 emissions in the soil tillage in Croatia. *Agr. Ecosyst. Environ.* 115, 290-294.

Guérif, J., 1990. Factors influencing compaction-induced increases in soil strength. *Soil Till. Res.* 16, 167–178.

Guimarães, R.M.L., Tormena, C.A., Alves, S.J., Fidalski, J., Blainski, E., 2009. Tensile strength, friability and organic carbon in an oxisol under a crop-livestock system. *Scientia Agricola*. (Piracicaba, Brasil.), Vol.66, No4, 499-505.

Hadas, A., Wolf, D., 1984. Refinement and re-evaluation of the drop-shatter soil fragmentation method. *Soil Till. Res.* 4, 237–249.

- Hallett, P.D., Dexter, A.R., Seville, J.P.K., 1995a. Identification of pre-existing cracks on soil fracture surfaces using dye. *Soil Till. Res.* 33, 163–184.
- Hallett, P.D., Dexter, A.R., Seville, J.P.K., 1995b. The application of fracture mechanics to crack propagation in dry soil. *Eur. J. Soil Sci.* 46, 591–599.
- Hossne, A.J., 2008. Índice de friabilidad de un suelo franco arenoso de sabana del estado de Monagas, Venezuela. *UDO Agrícola* 8 (1): 107-117.
- IGAC - Instituto Geográfico Agustín Codazzi., 2006. Estudio Detallado de Suelos y Capacidad de Uso de las Tierras Sembradas con Caña de Azúcar en el Valle Geográfico del Río Cauca. Bogotá.
- Imhoff, S., Da Silva, P.A., and Dexter, A.R., 2002. Factors contributing to the tensile strength and friability of Oxisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66, 1656-1661.
- Karlen, D.L., Erbach, D.C., Kaspar, T.C., Colvin, T.S., Berry, E.C., and Timmons, D.R., 1990. Soil tith: a review of past perceptions and future needs. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54, 153-161.
- Macks, S.P., Murphy, B.W., Cresswell, H.P., and Koen, T.B., 1996. Soil friability in relation to management history and suitability for direct drilling. *Aust. J. Soil Res.* 34, 343-360.
- Munkholm, L.J., Schjønning, P., Kay, B.D., 2002a. Tensile strength of soil cores in relations to aggregate strength, soil fragmentation and pore characteristics. *Soil Till. Res.* 64, 125–135.
- Munkholm, L.J., Schjønning, P., Deboz, K., Jensen, H.E., Christensen, B.T., 2002b. Aggregate strength and mechanical behaviour of a sandy loam soil under long-term fertilization treatments. *Eur. J. Soil Sci.* 53, 129–137.
- Munkholm, L. J., 2011. Soil friability: A review of the concept, assessment and effects of soil properties and management (Review). *Geoderma* 167-168, 236–246.
- Munkholm, L.J., Heck, R.J., Deen, B., 2012. Soil pore characteristics assessed from X-ray micro-CT derived images and correlations to soil friability. *Geoderma* 181-182, 22-29.
- Peeyush, S.; Chakkrapong, T.; Vilas, M.S., 2013. Energy consumption and CO2 emissions in rainfed agricultural production systems of Northeast Thailand. *Agricul. Syst.* 116, 25-36.
- Rahimi, H., Pazira, E., Tajik, F., 2000. Effect of soil organic matter, electrical conductivity and sodium adsorption ratio on tensile strength of aggregates. *Soil Till. Res.* 54, 145-153.
- Robertson, G.P.; Paul, E.A.; Harwood, R.R., 2000. Greenhouse gases in intensive agriculture: contributions of individual gases to the radiative forcing of the atmosphere. *Scien.* 289, 1922-1925.
- Snyder, V.A., Vázquez, M.A., Martínez, G., Ramírez, L., Hadas, A., 1995. Controlled displacement technique for measuring soil friability. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59, 44–52.

Tormena, C.A., Araujo, M.A., Fidalsky, J., Imhoff, S., Da Silva, A.P., 2008. Quantification of tensile strength and friability of an Oxisol (Acrudox) under no-tillage. *Rev Bras. Cien. Sue.* 32 (3), 1-11.

USDA - United States Department of Agriculture., 2002. Field Book for Describing and Sampling Soils. Version 2.0. National Soil Survey Center. Natural Resources Conservation Service, pp. 2-42/2-60.

Utomo, W.H., Dexter, A.R., 1981. Soil friability. *J. Soil Sci.* 32, 203–213.

Watts, C.W., and Dexter, A.R., 1998. Soil friability: theory, measurement and the effects of management and organic carbon content. *Eur. J. Soil Sci.* 49, 73–84.



# Capítulo 1. Determinación de la friabilidad del suelo: Una revisión de sus principales métodos de estimación con énfasis en la determinación cuantitativa de la resistencia al rompimiento

**Determining soil friability: A review of the principal estimation methods with an emphasis on the quantitative determination of the tensile strength**

## 1.1 Resumen

La friabilidad es una propiedad determinante para establecer el momento adecuado de la labranza. Cuando se trabaja el suelo en un estado de óptima friabilidad, se facilita la generación de un medio propicio para el establecimiento de las plantas, con bajos requerimientos de energía. Entender el comportamiento de la friabilidad permite la toma de decisiones apropiadas para la reducción del consumo de energía, el manejo y la conservación de la calidad física del suelo. En esta revisión se sintetizan los métodos que actualmente se utilizan para la determinación de la friabilidad del suelo, con énfasis en el método de resistencia al rompimiento (RR). La friabilidad puede ser determinada a partir de métodos cualitativos, semicuantitativos y cuantitativos. El análisis cualitativo se basa en el examen visual de la estructura y consistencia del suelo, mientras que el análisis semi-cuantitativo se centra en la cuantificación de la distribución de agregados o fragmentos producto del sometimiento del suelo a impacto por caída. Los métodos cuantitativos permiten determinar la friabilidad de forma directa mediante la determinación de la resistencia del suelo, o de forma indirecta, mediante la inferencia a partir del comportamiento de otras propiedades del suelo (curva de retención de agua, porosidad y funciones de pedotransferencia). El método cuantitativo de RR se realiza mediante la compresión de agregados naturales o remoldeados de suelo (en estado seco o húmedo), hasta lograr su fractura, y es uno de los más aceptados para la estimación de la friabilidad. Los métodos cualitativos se realizan directamente en campo, de manera fácil y rápida pero su resultado es menos confiable. Los métodos semicuantitativos (rompimiento del suelo por caída) pueden realizarse en campo o laboratorio pero no ofrecen información precisa sobre la resistencia del suelo. Los métodos cuantitativos en cambio, implican el transporte de las muestras al laboratorio, mayor tiempo de ejecución y equipos y personal especializado, pero sus resultados son más confiables y reproducibles.

**Palabras clave:** índice de friabilidad, agregados del suelo, calidad del suelo, resistencia a la compresión, labranza del suelo.

## 1.2 Abstract

Friability is a determinant property for establishing the suitable timing of tillage. When soil is in the optimal friability state, a favorable medium is provided for establishing plants with low energy requirements. Understanding the behavior of friability facilitates making decisions that are appropriate for reductions in energy consumption, management, and preservation of soil physical quality. This review shows the methods that are currently used the determination of soil friability with emphasis on tensile strength method (TS). Friability can be determined by qualitative, semi-quantitative, and quantitative methods. Qualitative analyses are based on the visual examination soil the structure and consistency, while semi-quantitative analyses focus on quantification of distribution of aggregates or fragments that result by subjecting soil to an impact force from rupture. Quantitative methods allow for the direct determination of friability through the determination of soil strength or for an indirect determination through an inference from behavior of other soil properties (water retention curve, porosity, and pedotransfer functions). The TS quantitative method is carried using the compression of natural or remodeled aggregates of the soil (dry or wet) until they are fractured; This is one of the most accepted methods for estimating friability. Qualitative methods are carried out directly in the field with an easy and quick methodology, but the results are less reliable. Semi-quantitative methods (breaking up the soil by dropping it) can be carried out in the field or in laboratory, but they do not provide precise information on soil strength. On the other hand, quantitative methods require transport of samples to a laboratory, more time and equipment, and specialized personnel, but the results are more reliable and can be replicated.

**Keywords:** friability index, soil aggregates, soil quality, compressive strength, soil tillage.

## 1.3 Introducción

La friabilidad es una propiedad física esencial para la determinación de la respuesta del suelo a las operaciones de labranza y un factor clave en la obtención de una capa arable con el tamaño de agregados adecuado para el crecimiento de las raíces (Munkholm, 2011). En estado friable los suelos requieren una labranza mínima para producir una adecuada cama de siembra y, por el contrario, aquellos que no lo están, pueden requerir alta demanda de energía en la labranza y el resultado final es un lecho de siembra inadecuado para la germinación, emergencia y establecimiento de plantas (Mullins et al., 1990; Macks et al., 1996). Adicionalmente, el suelo en estado friable presenta menor riesgo a la degradación estructural (Macks et al., 1996).

Utomo y Dexter (1981) y Dexter y Watts (2001) definen la friabilidad como la tendencia de una masa de suelo no confinada a desmoronarse en un intervalo particular de agregados de menor tamaño bajo un esfuerzo aplicado. Lo que se desea con el estado friable del suelo es que los agregados más grandes (terrones) al romperse por efecto de un esfuerzo aplicado (generalmente el uso de implementos de labranza), se fragmenten en un conjunto homogéneo de agregados más pequeños resistentes a la degradación y cuyo tamaño ofrezca un medio óptimo para el desarrollo del sistema radical de las plantas. Una buena cama de siembra es uno

de los objetivos de la labranza, actividad que se lleva a cabo más fácilmente en suelos friables en los que los terrones grandes son relativamente débiles y los agregados pequeños son relativamente fuertes y resistentes al desmoronamiento (Dexter, 1997; Schjónning et al., 2002). Watts y Dexter (1998), consideran la friabilidad como un indicador de la calidad estructural del suelo y Macks et al. (1996), la sugieren como un indicador de la condición estructural para la plantación de cultivos en siembra directa. De acuerdo con Karlen et al. (1990), un suelo en estado friable es una condición asociada a una adecuada labranza.

Para la estimación de la friabilidad se han empleado métodos cualitativos, semi-cuantitativos y cuantitativos (Munkholm, 2011). Los métodos cualitativos han sido ampliamente utilizados y se basan en la descripción de la morfología y grado de desarrollo de la estructura y la determinación de la consistencia del suelo en húmedo (USDA, 2002; FAO, 2009 y Ball et al., 2007). Los métodos semi-cuantitativos aplican el impacto de caída para fragmentar el material de suelo y establecer características como la distribución del tamaño de agregados, su diámetro geométrico medio o el diámetro promedio ponderado (Hadas y Wolf, 1984). Los métodos cuantitativos en su mayoría se basan en la determinación de la resistencia de los agregados del suelo, bien sea naturales o remoldeados. Se han documentado otros métodos cuantitativos para determinar la friabilidad en forma indirecta: i) relación de la friabilidad con la curva de retención de agua (Dexter, 2004a, Dexter, 2004b y Dexter y Bird, 2001); ii) relación de la friabilidad con la porosidad estructural (Guérif, 1990 y Munkholm et al., 2002b) y iii) a partir de funciones de pedotransferencia. Algunos autores como Snyder et al. (1995), consideran que es necesario establecer ensayos de friabilidad rápidos y sencillos que involucren pequeñas muestras de suelo.

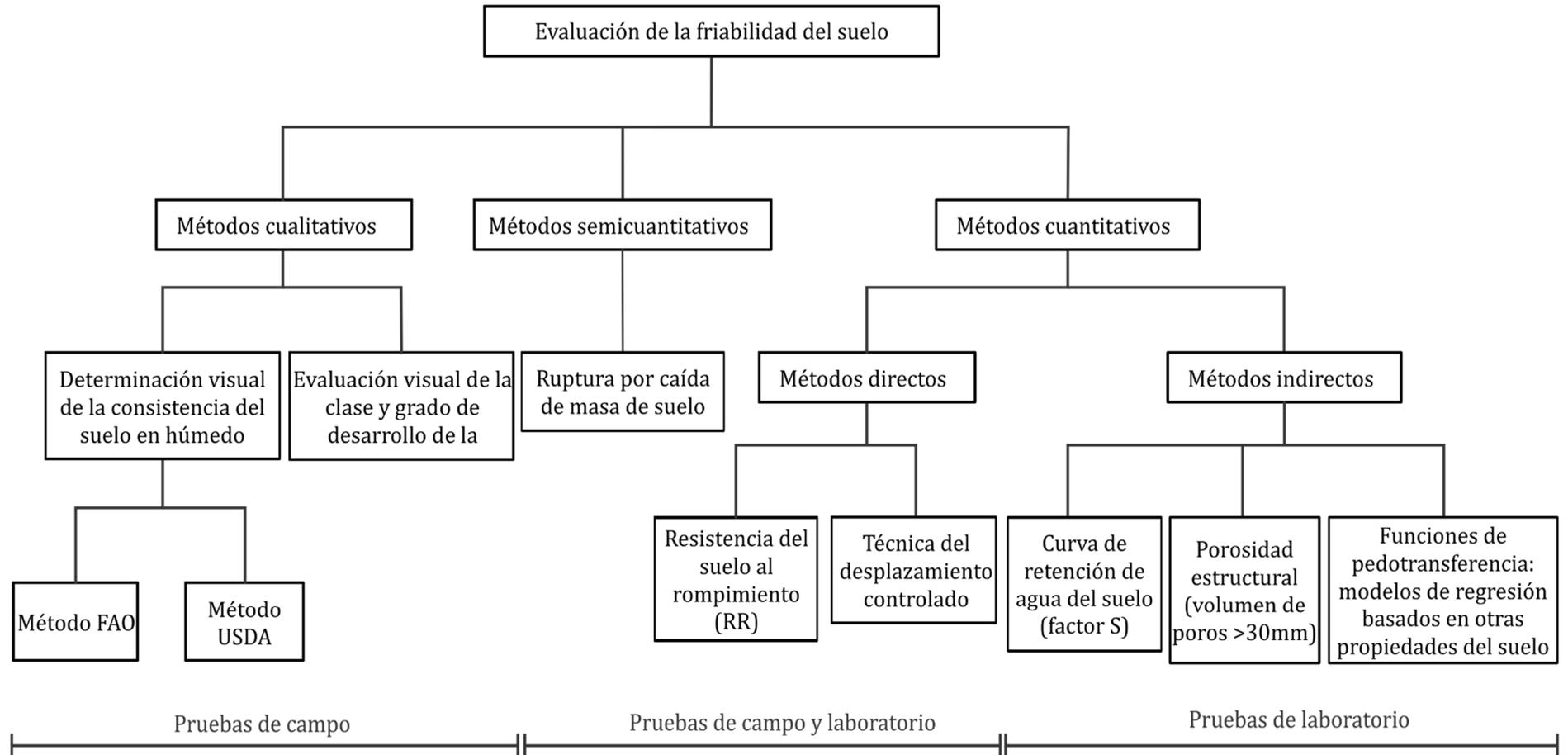
Uno de los métodos cuantitativos más aceptados es el de la RR (Utomo y Dexter, 1981; Watts y Dexter, 1998 y Dexter y Watts, 2001), produciendo la ruptura de agregados de suelos mediante un esfuerzo aplicado (compresión) en condiciones de laboratorio, y, a través de la determinación del coeficiente de variación de la RR, expresado a través de un intervalo de confianza, se determina un índice de friabilidad.

El objetivo de esta revisión es presentar una síntesis de los principales métodos cualitativos, semicuantitativos y cuantitativos para la determinación de la friabilidad del suelo, con especial énfasis en el método de resistencia al rompimiento.

## 1.4 Métodos para determinar la friabilidad del suelo

De acuerdo con Munkholm (2011), la friabilidad ha sido evaluada mediante la aplicación de métodos cualitativos de campo, semicuantitativos de campo y laboratorio, y cuantitativos realizados en condiciones controladas de laboratorio. En la Figura 1-1 se presentan los principales métodos utilizados en la evaluación de la friabilidad del suelo.

**Figura 1-1:** Principales métodos utilizados para evaluar la friabilidad del suelo.



### 1.4.1 Métodos cualitativos

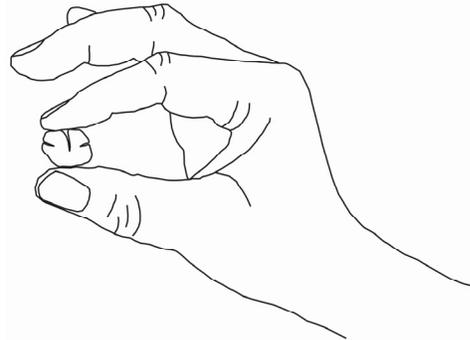
Se conocen principalmente dos métodos de evaluación cualitativa: a partir de la determinación de la consistencia del suelo en húmedo (USDA, 2002 y FAO, 2009), y a través de la evaluación de su estructura (Ball et al., 2007).

▪ **Determinación visual de la consistencia del suelo en húmedo**

Esta determinación se realiza normalmente cuando se lleva a cabo la descripción de la consistencia en los perfiles modales de suelos en los levantamientos edafológicos y se utilizan fundamentalmente dos métodos:

*Método USDA:* de acuerdo con USDA (1993), la consistencia se refiere a los atributos del material de suelo que se expresan con relación al grado de adhesión y cohesión o la resistencia a la deformación o ruptura. La consistencia es altamente dependiente de la condición de humedad y su descripción no tiene mucho sentido si no se especifica conjuntamente el contenido de agua del suelo. Para determinar la friabilidad por este método se coloca un agregado o terrón del suelo en estado húmedo entre el índice y el pulgar (Figura 1-2) o debajo del pie, y se aplica un esfuerzo de compresión que permita desmoronarlo o romperlo; en el caso de suelos muy consistentes que no se puedan fragmentar con la mano o el pie, el material de suelo se golpea contra una superficie dura. Para determinar la friabilidad por este método, se utilizan los criterios que aparecen en la Tabla 1-1.

**Figura 1-2:** Determinación de la friabilidad del suelo de manera manual (a partir de USDA, 2002).



**Tabla 1-1:** Categorías consideradas en la clasificación de la consistencia del suelo en húmedo (USDA, 2002).

Consistencia en húmedo		Descripción de la prueba	
Clase	Código	Operación	Fuerza aplicada
Suelta	S	No se puede obtener fragmento intacto	
Muy friable	MFR	Fuerza muy pequeña entre los dedos	< 8 N
Friable	FR	Ligera fuerza entre los dedos	8 a < 20 N

Consistencia en húmedo		Descripción de la prueba	
Clase	Código	Operación	Fuerza aplicada
Firme	FI	Moderada fuerza entre los dedos	20 a < 40 N
Muy firme	MFI	Gran fuerza entre los dedos	40 a < 80 N
Extremadamente firme	EFI	Fuerza moderada entre las manos	80 a < 160 N
Ligeramente rígida	LR	Presión del pie con el peso del cuerpo	160 a < 800 N
Rígida	R	Golpe leve	800 N a < 3 J
Muy rígida	MR	Golpe moderado a fuerte	≥ a 3 J

N=newton; J= julio

*Método FAO:* la consistencia se refiere al grado de cohesión o adhesión de la masa del suelo e incluye propiedades de este relacionadas entre sí como la friabilidad, plasticidad, adhesividad y resistencia a la compresión (FAO, 2009). Este método de determinación de la friabilidad guarda gran similitud con el establecido por USDA (2002), y consiste en describir la consistencia del suelo en las condiciones naturales de humedad del perfil; cuando se utiliza esta técnica en perfiles de suelo seco, se sugiere humedecerlo hasta llevarlo a una medida subjetiva próxima a capacidad de campo. En este método la consistencia se determina mediante el rompimiento de una masa de suelo entre los dedos y su clasificación se realiza con base en la respuesta del material de suelo al comprimirlo, en las categorías que se observan en la Tabla 1-2.

**Tabla 1-2:** Clasificación de la consistencia del suelo en húmedo (FAO, 2009).

Código	Tipo de consistencia en húmedo	Características del material de suelo
LO	Suelto	No coherente
VFR	Muy friable	El material de suelo se aplasta bajo presión leve entre los dedos, pero es coherente cuando se lo presiona todo al mismo tiempo
FR	Friable	El material de suelo se aplasta fácilmente bajo presión suave a moderada entre los dedos, y se vuelve coherente cuando se lo presiona junto
FI	Firme	El material de suelo se aplasta bajo presiones moderadas entre los dedos, pero su resistencia es mayor que la anterior categoría
VFI	Muy firme	El material de suelo se aplasta a presión fuerte entre los dedos; difícilmente aplastable entre los dedos
EFI	Extremadamente firme	El material de suelo se aplasta solo a presiones muy fuertes; no puede aplastarse entre los dedos

▪ **Evaluación visual de la clase y grado de desarrollo de la estructura del suelo**

Este método se basa en una modificación del inicialmente propuesto por Peerlkamp (1959), quien desarrolló una escala para evaluar la calidad de la estructura del suelo. Es un método de determinación de la friabilidad que generalmente se realiza directamente en campo y que

comprende fundamentalmente tres etapas: extracción y revisión del bloque de suelo, ruptura del bloque y asignación de la puntuación al suelo con base en la descripción de la estructura (Ball et al., 2007). A partir de los bloques que se extraen de cada horizonte (normalmente los superficiales) con la ayuda de una pala, se separan los agregados por sus planos de debilidad natural y se dejan expuestos para su observación los diferentes tamaños de agregados. En los agregados obtenidos se evalúa, mediante la utilización de una tabla guía, características como tamaño, forma, presencia de aristas y porosidad. Como este método se trabaja de manera independiente para cada horizonte del suelo, la evaluación final corresponde al producto de la puntuación de cada horizonte por su espesor y se pondera por la profundidad total considerada. En la Tabla 1-3 se presentan las categorías de evaluación consideradas en este método.

**Tabla 1-3:** Clasificación de la friabilidad del suelo basada en la evaluación visual de la estructura (Ball et al., 2007).

Código	Calidad de la estructura	Facilidad de ruptura (suelo húmedo)	Tamaño y apariencia de los agregados	Porosidad visible	Raíces
Sq1	<b>Friable</b> (se desmorona el bloque y tiende a caer de la pala).	Los agregados se desmoronan fácilmente con los dedos.	< de 6 mm después de desmoronarse.	Altamente porosos.	Raíces en todo el suelo.
Sq2	<b>Intacta</b> (el bloque se mantiene con su forma original en la pala).	Los agregados se rompen fácilmente con la mano.	Una mezcla de agregados porosos, redondeados, de 2 a 70 mm. No se presentan terrones.	La mayoría de los agregados son porosos.	Raíces en todo el suelo.
Sq3	<b>Firme</b>	No es difícil.	Una mezcla de agregados porosos de 2 mm a 10 cm; menos de 30% son < 1 cm. Algunos agregados (terrones) angulares, no porosos pueden estar presentes.	Macroporos y grietas presentes. Alguna porosidad dentro de los agregados se presenta como poros o raíces.	La mayoría de las raíces están alrededor de los agregados.
Sq4	<b>Compacta</b>	Difícil.	En su mayoría grandes > de 10 cm, subangulares no porosos; menos de 30% son menores de 7 cm. Puede presentarse estructura laminar.	Pocos macroporos y grietas.	Todas las raíces se concentran en los macroporos y alrededor de los agregados.
Sq5	<b>Muy compacta</b>	Bastante difícil.	En su mayoría grandes > de 10 cm, muy pocos menores de 7 cm, angulares y no porosos.	Muy baja, puede haber macroporos. Puede contener zonas anaeróbicas.	Pocas o ninguna, si hay algunas se concentran en grietas.

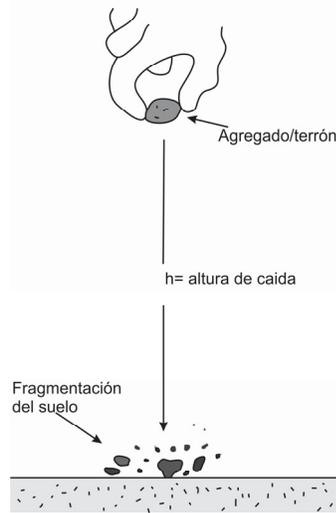
Este método es rápido, de fácil uso y reproducibilidad, pero su interpretación es subjetiva y puede variar de un evaluador a otro; además, es sensible al contenido de agua del suelo al momento de realizar la prueba (Munkholm, 2011).

## 1.4.2 Métodos semicuantitativos

### ▪ Rompimiento del suelo por caída

Este método permite determinar la friabilidad de un volumen (fragmento) de suelo y abordar principalmente la distribución del tamaño de fragmentos después de la caída e impacto de la masa de suelo sobre una superficie dura (Munkholm, 2011). La técnica consiste en obtener terrones de suelo y someterlos a caída libre sobre una superficie dura; los agregados o terrones pueden ser tomados directamente en campo u obtenidos a partir de bloques inalterados de suelo. Estos terrones o agregados se dejan caer desde una altura determinada, que de acuerdo con Hadas y Wolf (1984), no debe exceder los 1.5 m (Figura 1-3), de tal forma que con el impacto, estos sufran un proceso de fragmentación a lo largo de sus planos de debilidad subdividiéndose en unidades naturales más pequeñas (Marshall y Quirk, 1950). La distribución del tamaño de agregados resultante tras el impacto puede ser evaluada mediante la utilización de un juego de tamices, clasificando los tamaños de fragmentos de manera visual, o determinando gráficamente la distribución de tamaño de los mismos. Así mismo, se puede calcular el diámetro geométrico medio y el diámetro promedio ponderado de los agregados o fragmentos resultantes (Hadas y Wolf, 1984; Munkhol et al., 2002b; Munkholm, 2011; Munkholm, et al., 2012). Este método es altamente sensible y dependiente del contenido de agua de la muestra de suelo por lo que se hace necesario determinar su contenido al momento de realización de la prueba para que los resultados sean comparables. El principio del método se fundamenta en la subdivisión de una masa de suelo en volúmenes más pequeños a partir de la energía liberada al momento del impacto sobre una superficie dura (Hadas y Wolf, 1984).

**Figura 1-3:** Esquema representativo del método de rompimiento del suelo por caída.



Este método es fácil de realizar y se puede llevar a cabo directamente en campo o en el laboratorio; de igual forma, requiere menos tiempo en su ejecución y equipos menos especializados con respecto a determinaciones cuantitativas, pero no ofrece información precisa sobre la resistencia del suelo (Munkholm, 2011).

### 1.4.3 Métodos cuantitativos

Existen métodos de determinación directa e indirecta de la friabilidad; entre los primeros se encuentran la resistencia del suelo al corte (RR) (Utomo y Dexter, 1981 y Dexter y Watts, 2001) y el desplazamiento controlado (Snyder et al., 1995). Entre los de determinación indirecta se encuentran el de correlación con el índice de calidad estructural del suelo (S) a partir de la curva de retención de agua del suelo (Dexter, 2004a), el de determinación a partir de la estimación de la porosidad estructural, y la estimación mediante funciones de pedotransferencia (Macks et al., 1996 y Dexter, 2004b).

#### Métodos de determinación directa

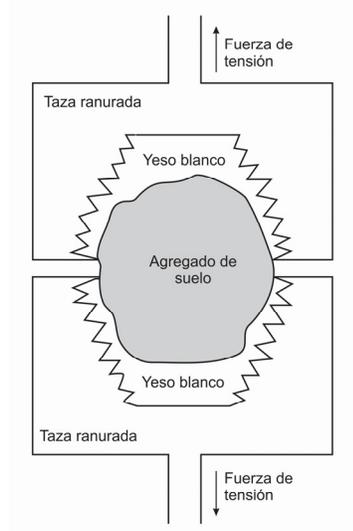
- **Determinación de la resistencia del suelo al corte (RR)**

La RR ha sido definida como la fuerza por unidad de área necesaria para provocar la ruptura en una muestra de suelo, es decir, para separarla (Dexter y Watts, 2001). Esta característica es sensible a la microestructura por la función que cumplen las microfisuras en la resistencia del suelo y permite cuantificar la friabilidad (Dexter, 1988a; Hallett, 1995b; Watts y Dexter, 1998). La resistencia del suelo depende del contenido de materia orgánica (Watts y Dexter, 1998; Imhoff et al., 2002; Guimarães et al., 2009; Blanco-Moure et al., 2012), el contenido de agua (Munkholm y Kay, 2002; Dexter, 2004b), la composición y concentración de la solución del suelo (Rahimi et al., 2000), la estabilidad de los agregados, los ciclos de humedecimiento y secado (Utomo y Dexter, 1981), la cantidad y tipo de arcilla (Barzegar et al., 1994, 1995) y la cantidad de arcilla dispersable (Kay y Dexter, 1992; Schjønning et al., 2011).

Según Munkholm (2011), la estimación de la RR es un procedimiento bien establecido y de uso común para cuantificar la friabilidad del suelo; adicionalmente, es un método cuyo enfoque es más objetivo con respecto a los métodos visuales descriptivos. La determinación de la friabilidad por este método se basa en que la resistencia del suelo a la fragmentación o desmoronamiento es controlada por la distribución de fisuras en el mismo (Watts y Dexter, 1998). Estas fisuras corresponden a los espacios generados por los poros estructurales, los cuales bajo tensión mecánica (especialmente compresión), pueden alargarse y unirse con otros generando grietas de mayor dimensión que constituyen los límites de los nuevos fragmentos producidos por el desmoronamiento durante las operaciones de labranza (Dexter, 2004a).

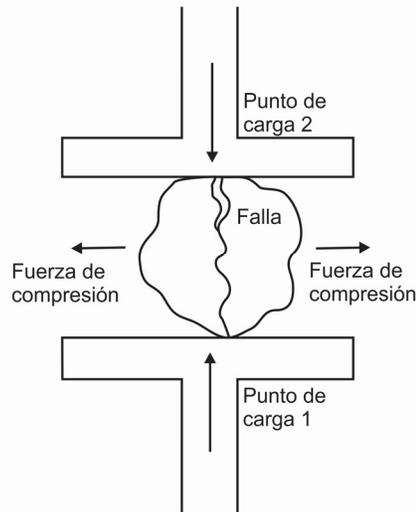
Se conocen dos tipos de ensayos de resistencia del suelo al corte: tensión y compresión; en el primero, la muestra de suelo es fragmentada en dos partes por efecto de la fuerza de tensión generada desde el centro de la muestra hacia sus extremos (Figura 1-4), por lo que al final, la muestra de suelo se fractura con una grieta que es perpendicular a la fuerza aplicada. Ensayos de resistencia a la tensión son complejos y difíciles de realizar, por lo que no son frecuentemente utilizados (Dexter y Watts, 2001).

**Figura 1-4:** Esquema de agregado de suelo en la prueba de resistencia a la tensión (a partir de Dexter y Watts, 2001).



Por el contrario, en el método de resistencia a la compresión la fuerza es aplicada a través del diámetro de la muestra tal como se observa en la Figura 1-5.

**Figura 1-5:** Esquema de agregado de suelo sometido a rompimiento en el ensayo de resistencia a la compresión (a partir de Dexter y Watts, 2001).



Las muestras de suelo que se utilizan para la determinación de la RR corresponden a agregados o terrones de diferente tamaño, obtenidos de bloques indisturbados de suelo tomados en el horizonte y profundidad deseados; sin embargo algunos investigadores trabajan con agregados de suelo remoldeados (Barzegar et al., 1995). Los bloques son transportados al laboratorio evitando su rompimiento o debilitamiento y allí se realiza la separación de

agregados por los planos de debilidad natural; dependiendo de las características del ensayo los agregados obtenidos pueden ser sometidos a humedecimiento a diferentes contenidos de agua, secado al aire, secado en horno a temperaturas bajas (< 60°C) o, incluso, secado en horno hasta los 105°C. Los agregados secos se pasan a través de un juego de tamices que permite seleccionar el tamaño (o tamaños) de los agregados requeridos para la prueba. Algunos investigadores han empleado también muestras cilíndricas (sin disturbar) para la determinación de la resistencia a la compresión del suelo (Dexter y Kroesbergen, 1985; Munkholm et al., 2002a).

El diámetro de los agregados debe ser conocido antes de hallar la resistencia a la compresión, sin embargo, el diámetro esférico efectivo de los mismos no se puede determinar con exactitud debido a su forma irregular. Dexter y Kroesbergen (1985) describen cinco diferentes técnicas para la estimación del diámetro efectivo de los agregados:

*Técnica 1:* la muestra de suelo se pasa a través de un juego de dos tamices, cuyo valor de abertura de malla depende del rango de tamaño de agregado de interés. Los agregados colectados pasan a través del tamiz superior con una abertura de malla  $d_1$  pero no través del tamiz inferior con abertura de malla  $d_2$ . El diámetro medio de los agregados ( $D_1$ ), cuyo valor es el asumido para todos los agregados individuales de la muestra, se determina a partir de:

$$D_1 = (d_1 + d_2) / 2 \quad (1.1)$$

Esta técnica que generalmente es utilizada para agregados de diferentes tamaños, ofrece como ventaja la posibilidad de trabajar con agregados de tamaño menor a 3 mm que normalmente ofrecen dificultad para su medición por otros métodos.

*Técnica 2:* los agregados una vez separados son medidos individualmente con calibrador u otro dispositivo de medición adecuado. Dentro del rango de agregados seleccionado se debe medir el más grande ( $D_x$ ), el intermedio ( $D_y$ ) y el más pequeño: ( $D_z$ ). En esta técnica el diámetro aritmético medio de los agregados ( $D_2$ ) es hallado a partir de:

$$D_2 = (D_x + D_y + D_z) / 3 \quad (1.2)$$

Este método presenta como ventaja que al determinar individualmente el diámetro de los agregados y la fuerza de compresión a la ruptura, permite reducir la varianza de los resultados de la RR.; sin embargo, no tiene buena aplicabilidad en agregados menores de 5 mm o en agregados de formas muy irregulares.

*Técnica 3:* los agregados individuales son medidos como en la técnica 2, pero el diámetro geométrico medio ( $D_3$ ) es calculado a partir de:

$$D_3 = (D_x D_y D_z)^{1/3} \quad (1.3)$$

Esta técnica presenta las mismas limitaciones que la número 2.

*Técnica 4:* se sigue el mismo procedimiento de tamizado de los agregados de la técnica 1 pero el diámetro efectivo es ajustado con base en las masas individuales de los agregados  $M$ . El

ajuste se realiza considerando que todos los agregados de la muestra tienen igual densidad aparente. Por lo tanto, si la masa media de un lote de agregados es  $M_0$ , se tiene:

$$D_4 = D_1(M/M_0)^{1/3} \quad (1.4)$$

donde  $D_1$  es el tamaño medio de los agregados seleccionados y  $M$  la masa de cada agregado. Este método es efectivo y confiable, ya que las masas individuales de los agregados se pueden obtener con rapidez y precisión mediante pesaje; así mismo, permite trabajar con agregados grandes y pequeños.

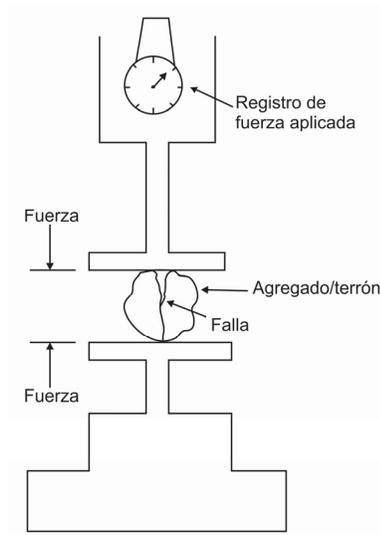
*Técnica 5:* en esta técnica, al igual que en la anterior, el diámetro individual de los agregados es ajustado de acuerdo con sus masas individuales ( $M$ ), pero en esta la densidad media de los agregados ( $d_a$ ) es conocida. Asumiendo que el diámetro de la esfera tiene el mismo volumen del agregado irregular, se tiene:

$$D_5 = (6M/\pi d_a)^{1/3} \quad (1.5)$$

Esta técnica ofrece una buena precisión en la medida de los agregados pero su desventaja es que solo se puede aplicar en suelos no expandibles o sometidos a ruptura en condición seca; adicionalmente, determinar la densidad aparente de cada agregado es muy dispendioso en tiempo y genera mayores costos.

Una vez determinada la masa individual y el diámetro efectivo, los agregados son sometidos individualmente a un esfuerzo de compresión, mediante la utilización de una prensa con dos platos paralelos para determinar la fuerza máxima necesaria para producir la ruptura del agregado (Figura 1-6) [Dexter y Kroesbergen \(1985\)](#).

**Figura 1-6:** Determinación de la resistencia del suelo a la compresión.



La RR de los agregados se calcula mediante la ecuación propuesta por [Utomo y Dexter, 1981](#); [Dexter y Kroesbergen \(1985\)](#) y [Dexter y Watts, 2001](#):

$$RR=0.576 (P/D^2) \quad (1.6)$$

En esta ecuación, RR (generalmente expresada en kPa) es la resistencia al rompimiento, P (N) el pico de fuerza registrado al momento de la ruptura del agregado, D (m) el diámetro efectivo de los agregados y el valor 0.576 corresponde a una constante de proporcionalidad (Dexter y Kroesbergen, 1985, Dexter y Watts, 2001). Esta constante es la relación entre el esfuerzo de la compresión inconfiada polar y el esfuerzo de compresión producido dentro de la muestra; de esta constante se han propuesto valores que van desde 0.576 (Braunack et al., 1979) hasta 1.86 (Dexter, 1988b).

Basados en la RR, Watts y Dexter (1998) proponen el coeficiente de variación univariante como herramienta para estimar el índice de friabilidad, este coeficiente está dado por la ecuación:

$$IF = \frac{\sigma_y}{\bar{Y}} \pm \frac{\sigma_y}{\bar{Y}\sqrt{2n}} \quad (1.7)$$

donde IF es el índice de friabilidad,  $\sigma_y$  es la desviación estándar de los valores medidos de RR y,  $\bar{Y}$  es la media de la RR medida en  $n$  réplicas. El segundo término es el error estándar del coeficiente de variación.

Si bien el análisis univariante del coeficiente de variación es confiable para la determinación del índice de friabilidad, la medida multivariante ofrece una mayor confiabilidad ya que toma en cuenta las covarianzas de la RR por tamaño de los agregados, así como las correlaciones que pueden existir entre las medidas asociadas al tamaño de los agregados. El coeficiente de variación multivariado solo requiere del cálculo del vector de medias ( $\mu$ ) y la matriz de varianzas y covarianzas ( $\Sigma$ ) de la RR. Albert y Zhang (2010), proponen una medida novedosa del coeficiente de variación multivariante la cual puede aplicarse en muestras pequeñas y no requiere de la inversión de la matriz de varianzas y covarianzas. Para estos autores, en el caso de una muestra de datos de RR con  $p$  mediciones en muestras de tamaño  $n$ , el vector  $\mu$  se estima con  $\bar{x}$  y  $\Sigma$  con  $S$ , a partir de:

$$CV_m = [(\bar{y}^T S \bar{y}) / (\bar{y}^T \bar{y})^2]^{1/2} \quad (1.8)$$

donde,  $CV_m$  es el coeficiente de variación multivariante,  $\bar{y}^T$  representa a la traspuesta ( $T$ ) del vector de medias muestrales de la RR y  $S$  representa a la matriz de varianzas y covarianzas muestral.

Para interpretar la friabilidad del suelo a partir del coeficiente de variación de la RR se utiliza la clasificación que se presenta en la Tabla 1-4.

**Tabla 1-4:** Interpretación del índice de friabilidad estimado mediante el coeficiente de variación (Imhoff et al., 2002).

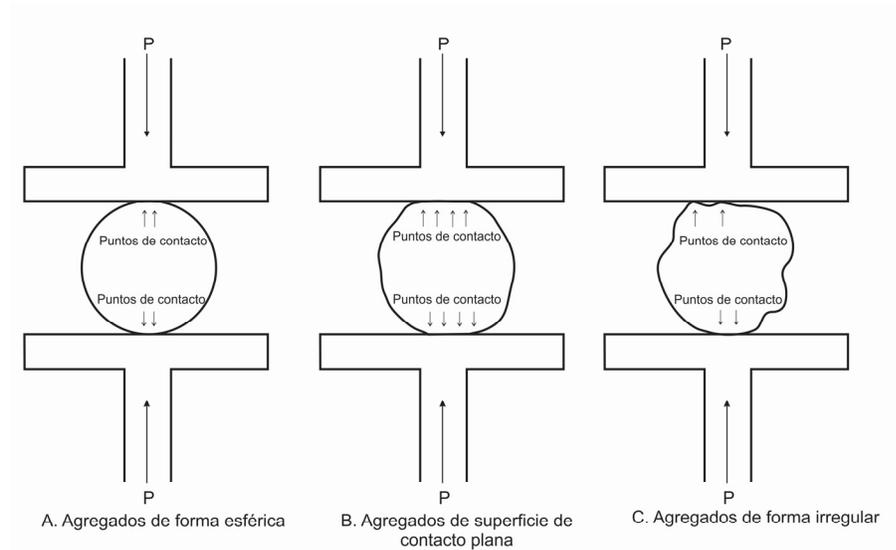
Índice de friabilidad	Calificación de la friabilidad
< 0.1	No friable
0.1 - 0.2	Ligeramente friable
0.2 - 0.5	Friable
0.5 - 0.8	Muy friable
> 0.8	Mecánicamente inestable

Los valores más altos de friabilidad en los terrones o agregados de mayor tamaño, en relación con los de tamaño menor, indica que los primeros tienen una RR baja, por lo que pueden ser más fácilmente fragmentados en sub-unidades más pequeñas de mayor RR, con bajos requerimientos de energía para la labranza. Bajo esta condición el suelo requiere un mínimo de labranza para producir una buena cama de siembra, generando agregados de tamaño tal que ofrecen las condiciones óptimas para la germinación y el establecimiento de la plantas (Macks et al, 1996). Lo deseable en la capa arable del suelo es que los agregados pequeños tengan un menor índice de friabilidad (mayor RR), y en los grandes, este índice sea mayor (menor RR) (Utomo y Dexter, 1981).

Algunos autores sugieren que la forma de los agregados influye también sobre la determinación de la RR. Seben et al. (2013) determinaron la RR tomando agregados en el rango de tamaño entre 12.5 y 19 mm, separándolos en tres tipos de formas y tratando de preservar su estructura inherente, así: (i) agregados de formas irregulares, (ii) agregados de formas esféricas y (iii) agregados de formas planas en la superficie de contacto con los platos de compresión (Figura 1-7). Esos autores encontraron que los agregados con formas irregulares presentaron resistencias a la compresión más altas (306 kPa), comparados con los de formas esféricas (238 kPa) y los de formas planas en su superficie de contacto (129 kPa). Lo anterior se explica por los puntos de cada agregado que entran en contacto con los platos paralelos del equipo de compresión.

Sin embargo, la manipulación que se realiza de los agregados cuando se pulen y raspan de forma manual para adaptarlos a las formas referidas, puede debilitar los agregados y generar menores valores de RR, especialmente en los agregados más débiles y de menor tamaño.

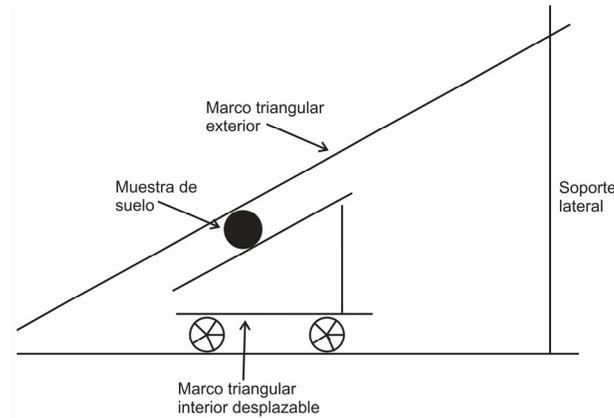
**Figura 1-7:** Efecto de la forma de los agregados sobre la determinación de la resistencia a la compresión: (A) agregados de forma esférica, (B) agregados de superficie de contacto plana y (C) agregados de forma irregular (a partir de [Seben et al., 2013](#)).



### ▪ Desplazamiento controlado

Este método que se fundamenta en la fragmentación de muestras cilíndricas de suelo a partir de una técnica de laboratorio que simula la compresión-cizallamiento controlado del suelo a diferentes contenidos de agua, fue propuesto por [Snyder et al. \(1995\)](#). Para estos investigadores, la friabilidad está fuertemente influenciada por el contenido de agua en el suelo, por lo que para determinar de forma directa el contenido de agua al cual los suelos alcanzan la condición óptima de friabilidad, se requeriría labrar el suelo a diferentes contenidos de agua y determinar posteriormente en cuál de ellos se logra la mejor fragmentación y distribución de agregados; no obstante, estos experimentos de campo son costosos y requieren tiempo considerable. En este sentido y ante la necesidad de implementar técnicas simples que permitan en pequeñas cantidades de suelo estimar en corto tiempo la friabilidad del suelo, [Snyder et al. \(1995\)](#) proponen un método para determinar el contenido de agua al cual los suelos logran su máxima friabilidad, que para algunos autores ([Watts y Dexter, 1998](#); [Hossne, 2008](#)), se logra en un punto cercano al límite plástico. La técnica es sencilla y se basa en un equipo con un marco triangular en posición vertical sobre rodillos de fricción que le permiten movimiento hacia adelante y hacia atrás dentro de un marco más grande de igual forma geométrica (Figura 1-8). La muestra que se utiliza es obtenida a través de un cilindro (muestra indisturbada) que se coloca entre las secciones de la hipotenusa de los dos marcos; el marco triangular interno en su desplazamiento provoca un efecto de compresión-cizallamiento a la muestra fragmentándola; el equipo provee cargas hasta de 2000 N. La ventaja de este método es que se simula un movimiento de compresión-cizallamiento muy parecido al producido por los implementos de labranza y permite determinar la fragmentación del suelo mediante la estimación del diámetro geométrico medio de los fragmentos. El método es poco conocido y por consiguiente requiere adecuada validación.

**Figura 1-8:** Transformador diferencial lineal variable (esquema general) para prueba de friabilidad (a partir de [Snyder et al., 1995](#)).



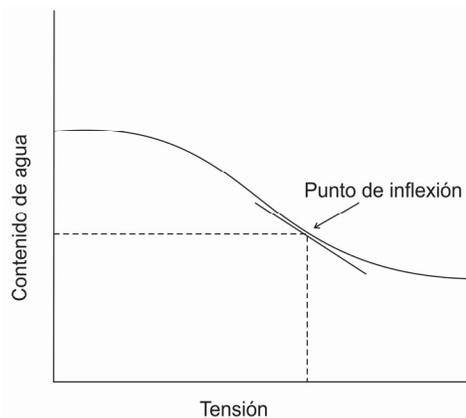
### Métodos de determinación indirecta

Se han propuesto algunos métodos que permiten inferir la friabilidad a partir del análisis de otras características del suelo, específicamente mediante la determinación de la curva de retención de agua del suelo ([Dexter, 2004a](#)) y la porosidad estructural del mismo ([Guerif, 1990](#) y [Munkholm et al., 2002b](#)).

#### ▪ Curva de retención de agua del suelo

Este método se basa en la correlación entre el índice de calidad física del suelo  $S$ , establecido por [Dexter \(2004a\)](#), y la friabilidad. Para ello se utiliza el punto de inflexión de la curva de retención de agua del suelo (Figura 1-9), que corresponde al máximo valor del índice de calidad física del suelo  $S$ , como una medida de la condición óptima de friabilidad ([Dexter, 2004b](#); [Santos et al., 2011](#)). De esta manera se tiene una medida indirecta de la friabilidad puesto que, por sí mismo, el método no permite proporcionar información sobre la resistencia o la fragmentación del suelo ([Munkholm, 2011](#)).

**Figura 1-9:** Punto de inflexión de la curva de retención de agua del suelo (máximo valor de  $S$ ).



El índice de calidad física del suelo  $S$ , de acuerdo con Dexter (2004a), depende en gran medida de la porosidad microestructural del suelo, por lo tanto  $S$  influye directamente en muchas de las principales propiedades físicas del suelo. Dexter y Bird (2001), identificaron el contenido de agua que tiene el suelo en el punto de inflexión de la curva de retención de agua (máximo valor de  $S$ ), como el contenido de agua óptimo para la labranza; en el que se produce el mayor número de pequeños agregados, o, por el contrario, el menor número de grandes agregados o terrones (Dexter, 2004b).

La correlación entre la friabilidad y la curva de retención de agua fue demostrada por Dexter (2004b), mediante su trabajo experimental con suelos de diferente friabilidad, contenido de agua y distribución de tamaño de agregados luego de ser labrados. Se demostró que la friabilidad fue lineal y correlacionó positivamente con el índice de calidad física,  $S$ .

#### ▪ Porosidad estructural

Este método consiste en estimar la friabilidad del suelo con base en la determinación del volumen de poros de diámetro equivalente mayor de  $30\ \mu\text{m}$  (Munkholm, 2011). Guerif (1990) y Munkholm et al. (2002b), encontraron correlaciones significativas entre la resistencia del suelo y la macroporosidad y una correlación lineal negativa entre la resistencia del suelo y los volúmenes de poros mayores de  $60\ \mu\text{m}$  ( $R^2=0.54^{***}$ ) y de poros mayores de  $30\ \mu\text{m}$  ( $R^2=0.35^*$ ). Para Munkholm (2011, 2012), el uso de la macroporosidad o porosidad estructural constituye una alternativa metodológica para evaluar la friabilidad; sin embargo, presenta como limitante que incluye tanto las grietas como los bioporos y, adicionalmente, ella en sí misma no proporciona información sobre la resistencia del suelo. Al igual que el método basado en la curva de retención de agua, descrito anteriormente, este método corresponde a una estimación indirecta de la friabilidad (Munkholm, 2011); por lo tanto, a partir de ellos no es posible determinar ni la RR, ni la fragmentación del suelo.

#### ▪ Funciones de pedotransferencia

La estimación de la friabilidad a partir de funciones de pedotransferencia se fundamenta en la medición de otras propiedades del suelo como la densidad aparente, sortividad, contenido de carbono orgánico e índice de estabilidad de los agregados y, a partir de modelos de regresión, realizados para un determinado número de muestras, obtener un estimativo de la friabilidad (Macks et al., 1996). Sin embargo, se requiere de mayor experimentación y una base de datos que incluya una gama amplia de tipos de suelos para confirmar la aplicabilidad de estas relaciones.

En general, son varias las opciones metodológicas disponibles para determinar la friabilidad de los suelos y, tal como señala Munkholm (2011), cada una de ellas mide diferentes aspectos de la friabilidad y se han utilizado para diferentes propósitos. Los métodos cualitativos y semicuantitativos son más accesibles a técnicos y agricultores, mientras que los métodos cuantitativos requieren un conocimiento y equipos más especializados.

## 1.5 Conclusiones

Existen diferentes métodos cualitativos para determinar la friabilidad del suelo, estos pueden realizarse directamente en campo de manera rápida y relativamente sencilla, pero su resultado es subjetivo y puede variar de un evaluador a otro. Adicionalmente se requiere determinar el contenido de agua del suelo al momento de realizar estas pruebas para obtener resultados aceptables, particularmente cuando se pretende determinar la friabilidad de diferentes tipos de suelos o en diferentes épocas de evaluación.

El método semicuantitativo (rompimiento del suelo por caída), es sencillo, fácil de realizar y por lo tanto ofrece buen rendimiento en su ejecución, pero tiene la desventaja de proporcionar muy poca información sobre la resistencia del suelo y ser muy sensible a los cambios en el contenido de agua del suelo.

Los métodos cuantitativos ofrecen una información más objetiva, precisa y reproducible de la friabilidad, pero requieren para su realización equipos más complejos, preparación adecuada de la muestra, mayores lapsos de tiempo y personal más especializado.

Uno de los métodos más confiables para determinar la friabilidad de los suelos se fundamenta en la determinación de la resistencia del suelo al corte. Este método cuantitativo ofrece la posibilidad de establecer la friabilidad del suelo mediante pruebas de compresión en terrones o agregados de diferente tamaño, en condición de suelo seco o a diferentes contenidos de agua.

## 1.6 Referencias

- Albert, A., Zhang, L., 2010. A novel definition of the multivariate coefficient of variation. *Biometrical J.* 52, 667-675.
- Ball, B.C., Batey, T., and Munkholm, L.J., 2007. Field assessment of soil structural quality – a development of the Peerlkamp test. *Soil Use Manage.* 23, 329-337.
- Barzegar, A.R., Murray, R.X., Churchman, G.J.; Rengasamy, P., 1994. The strength of remoulded soils as affected by exchangeable cations and dispersible clay. *Aust. J. Soil Res.* 32, 185-199.
- Barzegar, A.R., Oades, J.M., Rengasamy, P., Murray, R.S., 1995. Tensile strength of dry, remoulded soils as affected by properties of the clay fraction. *Geoderma* 65, 93-108.
- Blanco – Moure, N., Angurel, L.A., Moret-Fernández, D., López, M.V., 2012. Tensile strength and organic carbon of soil aggregates under long-term no tillage in semiarid Aragon (NE Spain). *Geoderma* 189-190, 423-430.
- Braunack, M.V., Hewitt, J.S., and Dexter, A.R., 1979. Brittle fracture of soil aggregates and the compaction of aggregate beds. *J. Soil Sci.* 30, 653-667.

- Dexter, A.R., 1988a. Advances in characterization of soil structure. *Soil Till. Res.* 11, 199–238.
- Dexter, A.R., 1988b. Strength of soil aggregates and of aggregate beds. *Catena Supplement* 11, 35–52.
- Dexter, A.R., 1997. Physical properties of tilled soil. *Soil Till. Res.* 43, 41-63.
- Dexter, A.R., 2004a. Soil physical quality Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma* 120, 201-214.
- Dexter, A.R., 2004b. Soil physical quality: Part II. Friability, tillage, tith and hard-setting. *Geoderma* 120, 215–225.
- Dexter, A.R., and Kroesbergen, B., 1985. Methodology for determination of tensile strength of soil aggregates. *J. Agr. Eng. Res.* 31, 139–147.
- Dexter, A.R., Watts, C.W., 2001. Tensile strength and friability. In: Smith, K.A., Mullins, C.E. (Eds.), *Soil and Environmental Analysis: Physical Methods*. Segunda edición. Marcel Dekker Inc, New York, pp. 405–433.
- Dexter, A.R., Bird, N.R., 2001. Methods for predicting the optimum and the range of soil water contents for tillage based on the water retention curve. *Soil Till. Res.* 57, 203–212.
- FAO - Organization of the United Nations Food and Agriculture., 2009. Guide for soil description. Fourth edition. Rome, pp. 49-52.
- Guérif, J., 1990. Factors influencing compaction-induced increases in soil strength. *Soil Till. Res.* 16, 167–178.
- Guimarães, R.M.L., Tormena, C.A., Alves, S.J., Fidalski, J., Blainski, E., 2009. Tensile strength, friability and organic carbon in an oxisol under a crop-livestock system. *Scientia Agricola*. (Piracicaba, Brasil.), Vol.66, No4, 499-505.
- Hadas, A., Wolf, D., 1984. Refinement and re-evaluation of the drop-shatter soil fragmentation method. *Soil Till. Res.* 4, 237–249.
- Hallett, P.D., Dexter, A.R., Seville, J.P.K., 1995b. The application of fracture mechanics to crack propagation in dry soil. *Eur. J. Soil Sci.* 46, 591–599.
- Hossne, G.A.J., 2008. Friability index of a savanna sandy loamy soil of Monagas state, Venezuela. *UDO Agrícola* 8 (1), 107-117.
- Imhoff, S., Da Silva, P.A., and Dexter, A.R., 2002. Factors contributing to the tensile strength and friability of Oxisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66, 1656-1661.
- Karlen, D.L., Erbach, D.C., Kaspar, T.C., Colvin, T.S., Berry, E.C., and Timmons, D.R., 1990. Soil tith: a review of past perceptions and future needs. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54, 153-161.

- Kay, B.D., Dexter, A.R., 1992. The influence of dispersible clay and wetting/drying cycles on the tensile strength of a red-brown earth. *Aust. J. Soil Res.* 30, 297-310.
- Macks, S.P., Murphy, B.W., Cresswell, H.P., and Koen, T.B., 1996. Soil friability in relation to management history and suitability for direct drilling. *Aust. J. Soil Res.* 34, 343-360.
- Marshall, T.J., Quirk, J.P., 1950. Stability of structural aggregates of dry soil. *Aust. J. Agr. Econ.* 1, 266-275.
- Mullins, C.E., MacLeod, D.A., Northcote, K.H., Tisdall, J.M., and Young, I.M., 1990. Hardsetting soils: Behaviour, occurrence and management. *J. Adv. Soil Sci.* 11, 37-108.
- Munkholm, L. J., 2011. Soil friability: A review of the concept, assessment and effects of soil properties and management (Review). *Geoderma* 167-168, 236-246.
- Munkholm, L.J., and Kay, B.D., 2002. Effect of water regime on aggregate-tensile strength, rupture energy, and friability. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66, 702-709.
- Munkholm, L.J., Schjønning, P., Kay, B.D., 2002a. Tensile strength of soil cores in relations to aggregate strength, soil fragmentation and pore characteristics. *Soil Till. Res.* 64, 125-135.
- Munkholm, L.J., Schjønning, P., Deboz, K., Jensen, H.E., Christensen, B.T., 2002b. Aggregate strength and mechanical behaviour of a sandy loam soil under long-term fertilization treatments. *Eur. J. Soil Sci.* 53, 129-137.
- Munkholm, L.J., Heck, R.J., Deen, B., 2012. Soil pore characteristics assessed from X-ray micro-CT derived images and correlations to soil friability. *Geoderma* 181-182, 22-29.
- Peerlkamp, P.K., 1959. A visual method of soil structure evaluation. *Meded. v.d. Landbouwhogeschool en pzoekingsstations van de Staat te Gent.* XXIV No. 24, pp. 216-221.
- Rahimi, H., Pazira, E., Tajik, F., 2000. Effect of soil organic matter, electrical conductivity and sodium adsorption ratio on tensile strength of aggregates. *Soil Till. Res.* 54, 145-153.
- Santos, G.G., da Silva, E., Marchao, R.B., da Silveira, P.M., Bruand, A., James, F., Becquer, T., 2011. Analysis of physical quality of soil using the water retention curve: Validity of the S-index. *C. R. Geoscience* 343, 295-301.
- Schjønning, P., Elmhøt, S., Munkholm, L. J., Deboz, K., 2002. Soil quality aspects of humid Sandy loams as influenced by organic and conventional long-term management. *Agr. Ecosyst. Environ.* 88, 195-214
- Schjønning, P., De Jonge, L.W., Munkholm, L.J., Moldrup, P., Christensen, B.T., Olesen, J.E., 2011. Clay dispersibility and soil friability-testing the soil clay-to-carbon saturation concept. *Soil Science Society of America Journal. Special section: Soil Architecture and Function. Vadose Zone J.* doi:10.2136/vzj2011.0067.

Seben, G. de F., Corá, J. E., Fernández, C., Lal, R., 2013. Aggregate shape and tensile strength measurement. Technical Article. *Soil Sci.* 178 (6), 301-307.

Snyder, V.A., Vazquez, M.A., Martinez, G., Ramirez, L., Hadas, A., 1995. Controlled displacement technique for measuring soil friability. . *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59, 44-52.

USDA., 1993. Soil Survey Manual. Soil Survey Division Staff. Handbook No 18, pp. 173-181.

USDA., 2002. Field Book for Describing and Sampling Soils. Versión 2.0. National Soil Survey Center. Natural Resources Conservation Service, pp. 2-42/2-60.

Utomo, W.H., Dexter, A.R., 1981. Soil friability. *J. Soil Sci.* 32, 203-213.

Watts, C.W., and Dexter, A.R., 1998. Soil friability: theory, measurement and the effects of management and organic carbon content. *Eur. J. Soil Sci.* 49, 73-84.



# Capítulo 2. Efecto del tamaño de los agregados y la diferenciación de horizontes superficiales sobre el índice de friabilidad de suelos cultivados con caña de azúcar: Un enfoque multivariante

Effect of aggregate size and superficial horizon differentiation on the friability index of soils cultivated with sugar cane: a multivariate approach

## 2.1 Resumen

La friabilidad del suelo es una propiedad física que proporciona valiosa información para minimizar el consumo de energía durante la labranza del suelo y adecuar el medio edáfico para el desarrollo de las plantas. Su determinación cuantitativa se realiza generalmente a partir de los tamaños de agregados dominantes en el suelo, obtenidos de bloques de suelo tomados directamente en campo; estos bloques frecuentemente se toman a profundidades fijas en el perfil sin considerar los diferentes horizontes superficiales del suelo. El objetivo de esta investigación fue determinar el efecto del tamaño de los agregados y la diferenciación de los horizontes superficiales en el índice de friabilidad (IF) de algunos suelos bajo caña de azúcar en el Valle Geográfico del Río Cauca (Colombia), usando el coeficiente de variación univariante ( $CV_u$ ) y multivariante ( $CV_m$ ) de la resistencia al rompimiento. El IF se estimó mediante una prueba de compresión para obtener la resistencia al rompimiento (RR) de 4 rangos de tamaño de agregados tomados de los horizontes superficiales Ap y A1 de 182 sitios de muestreo, provenientes de 18 fincas dedicadas al cultivo de caña de azúcar. De los 5 tipos de suelos estudiados (Inceptisoles, Molisoles, Vertisoles, Alfisoles y Ultisoles), se colectaron 7280 agregados que fueron secados al aire y posteriormente en horno a baja temperatura, previamente a la determinación de la RR, y a partir de esta, se calculó el IF usando el coeficiente de variación. El estudio encontró variación del IF con el tamaño de los agregados y con la profundidad del suelo (dos primeros horizontes); de 4 rangos de tamaño inicialmente seleccionados, solo 3 fueron relevantes. Se encontraron diferencias en el  $IF_i$  de los 5 tipos de suelos estudiados, mostrando los Alfisoles la mejor condición de friabilidad y los Inceptisoles la menos favorable. La utilización del  $CV_m$  resultó bastante útil en la selección de un valor más representativo para la friabilidad estimada mediante el  $CV_u$  de la RR, y permitió establecer que el valor del límite inferior ( $IF_i$ ) del intervalo de confianza del  $CV_u$ , fue el valor del IF más cercano a la medida multivariante.

**Palabras clave:** calidad del suelo, caña de azúcar, labranza, resistencia al rompimiento, resistencia a la compresión.

## 2.2 Abstract

Soil friability is a physical property that provides valuable information for minimizing energy consumption during the tillage of soils and adjusting the edaphic medium for the development of crops. Its quantitative determination is generally carried out using sizes of dominant soil aggregates, obtained from soil blocks taken directly from the field. These soil blocks are frequently taken at fixed depths in the profile without considering the different superficial horizons of the soil. This study aimed to determine the effect of the aggregate size and differentiation of the superficial horizons on the friability index (FI) of soils cultivated with sugar cane in the Valle Geográfico del Río Cauca region (Colombia) using univariate ( $CV_u$ ) and multivariate ( $CV_m$ ) coefficients of variation of the tensile strength. The FI was estimated with a compression test in order to obtain the tensile strength (TS) of 4 aggregate size ranges taken from the Ap and A1 surface horizons of 182 sampling sites located on 18 farms that are dedicated to the cultivation of sugar cane. From the 5 studied soil types (Inceptisols, Mollisols, Vertisols, Alfisols and Ultisols), 7280 aggregates were collected, which were air dried and subsequently placed in a low-temperature oven, before determining the TS, which was used to calculate the FI using the coefficient of variation. This study found a FI that varied with the aggregate size and soil depth (first two horizons). Only 3 of the 4 initially selected size ranges were relevant. Differences were observed in the FI for the 5 studied soil types, with Alfisols demonstrating the best conditions for friability and Inceptisols demonstrating the worst. The  $CV_m$  was highly useful for the selection of a more representative value from the confidence interval of the TS in the  $CV_u$  method for friability and helped demonstrate that the lower limit value ( $FI_i$ ) of the  $CV_u$  of the TS was the FI value that was closest to the multivariate measurement.

**Keywords:** soil quality, sugar cane, farming, tensile strength, compressive strength.

## 2.3 Introducción

La friabilidad se considera sinónimo de calidad de la condición física del suelo e indicador de su estado estructural (Macks et al., 1996; Watts y Dexter, 1998). Esta propiedad física suministra información valiosa cuando se quiere hacer del suelo un medio físicamente adecuado para el desarrollo de raíces y para minimizar la energía requerida durante la labranza del suelo (Munkholm, 2011).

La friabilidad ha sido definida como la tendencia de una masa de suelo no confinada a desmoronarse en un rango particular de agregados de menor tamaño bajo un esfuerzo aplicado (Dexter y Watts, 2001); por lo tanto, un suelo friable se caracteriza por la facilidad de fragmentación de sus agregados grandes (poco deseables para la siembra), y la resistencia a la fragmentación de los agregados pequeños (que los haría susceptibles a la degradación). Para

estimar la friabilidad se utilizan métodos cualitativos, semicuantitativos y cuantitativos (Munkholm, 2011); de estos, el método cuantitativo basado en la resistencia al rompimiento de agregados propuesto por Dexter y Watts (2001), es uno de los más utilizados. La RR, descrita como el esfuerzo necesario para causar ruptura de la masa de suelo (Dexter y Watts, 2001), es probablemente la medida más útil de la resistencia individual de los agregados, debido a la facilidad con que se realiza a partir de ensayos simples y con diversos tamaños de agregados (Dexter y Kroesbergen, 1985).

El coeficiente de variación es ampliamente utilizado para medir la variación relativa de una variable aleatoria a su medida o para evaluar y comparar el rendimiento de técnicas analíticas (Rencher, 2002). En el caso de la estimación de la friabilidad, el método propuesto por Watts y Dexter (1998), basado en el  $CV_u$  de la RR, ha sido recomendado como método estándar debido a su confiabilidad y facilidad de cálculo (Dexter y Watts, 2001). Sin embargo, cuando el IF se determina para un mismo suelo con diferentes tamaños de agregados, su friabilidad puede ser calculada usando un enfoque multivariante, que posee propiedades deseables desde el punto de vista estadístico (Rencher, 2002). El  $CV_m$  solo requiere el cálculo del vector de medias y la matriz de covarianzas de la RR. En la biometría, en la genética y en la edafología, suelen medirse múltiples características en individuos o en unidades experimentales de varias poblaciones, lo que en ocasiones genera dificultad al evaluar la variabilidad relativa de cada población. Claramente, el cálculo del  $CV_u$  de cada característica no es suficiente, ya que no toma en cuenta la estructura de la correlación entre las mediciones, asociadas en este caso en particular a los diferentes tamaños de agregados. La medida multivariante para el  $CV_m$  se puede obtener de:

$$CV_m = [(\bar{y}^T S \bar{y}) / (\bar{y}^T \bar{y})^2]^{1/2} \quad (2.1)$$

donde  $\bar{y}^T$  representa a la traspuesta (T) del vector de medias muestrales de la RR,  $\bar{y}$  el vector de medias muestrales de la RR y S representa a la matriz de varianzas y covarianzas muestral, que en este caso es de dimensión  $10 \times 10$ , debido a las 10 repeticiones obtenidas de la RR en cada muestra de suelo y en cada horizonte (Albert y Zhang, 2010).

La RR y la friabilidad son afectadas por otras propiedades físicas, químicas y mineralógicas del suelo (Macks et al., 1996; Munkholm et al., 2002, 2012), propiedades que guardan una relación muy estrecha con la génesis del suelo y también con los horizontes del mismo (Kempen et al., 2011). A menudo, la toma de muestras para el estudio de la friabilidad se realiza en una o varias profundidades fijas en el suelo, pero pocas veces a partir de la diferenciación de horizontes en los que las propiedades guardan cierta homogeneidad.

La friabilidad, y por tanto la RR, dependen de la estructura del suelo y particularmente de las microfisuras de este (Dexter, 2004b). Dexter (1988a); considera un orden jerárquico en la estructura del suelo, el cual parte de microagregados estables que se agrupan en agregados, y estos a su vez en terrones; cada agregado progresivamente más grande es más débil que sus constituyentes puesto que contiene microfisuras de mayor tamaño, por lo tanto, la variabilidad de la RR depende también del tamaño de los agregados. La gran mayoría de investigaciones en las que se estima la friabilidad del suelo a partir de la RR evalúan un solo rango de tamaño de agregados que generalmente está entre 12.5 y 19 mm (Imhoff et al., 2002; Tormena et al., 2008; Guimarães et al., 2009 y Seben et al., 2013). De acuerdo con Imhoff et al. (2002), este de rango de tamaño de agregado es el más fácil de separar manualmente y medir, así como el que más domina en el suelo

después de las operaciones de labranza. También se han reportado trabajos con rango de tamaño de agregados entre 13.2 y 19 mm (Watts y Dexter, 1998) y entre 2 y 4 mm (Rahimi et al., 2000). Otros estudios han involucrado más de un rango de tamaño de agregado, Chan (1989), por ejemplo, utilizó cuatro rangos comprendidos entre los 2.8 y 12.7 mm, Munkholm et al. (2002a, 2002b) igualmente usaron cuatro rangos distribuidos entre 2 y 16 mm y Macks et al. (1996) once rangos comprendidos entre 1.4 y 50 mm.

El objetivo de esta investigación fue determinar el efecto del tamaño de los agregados y la diferenciación de los horizontes superficiales en el índice de friabilidad de algunos suelos bajo caña de azúcar en el Valle Geográfico del Río Cauca (Colombia), usando el coeficiente de variación multivariante.

## 2.4 Materiales y métodos

### 2.4.1 Descripción del área donde se localizaron los sitios de muestreo

El estudio se llevó a cabo en 18 fincas dedicadas al cultivo de caña de azúcar con similares prácticas de manejo mecanizado de los suelos (Anexo A), localizadas en el centro y sur del Departamento del Valle del Cauca y norte del Departamento del Cauca (Colombia). Las coordenadas extremas del área donde se concentraron los sitios de observación fueron: 3°3'1" y 4°4'59" de latitud N y los 76°14'12.5" y 76°30'43.2" de longitud W. De acuerdo con la clasificación climática de Köppen el área de estudio corresponde al Tropical Lluvioso de Sabana (Aw).

### 2.4.2 Distribución de sitios de observación y tipos de suelos

En cada una de las fincas se localizó una unidad taxonómica de suelos, en la que se seleccionaron 5 sitios de observación distantes entre sí aproximadamente 100 m. En cada punto muestral se abrieron cajuelas de 50 x 50 cm de lado y 50 cm de profundidad, en las que se delimitó el primer y segundo horizontes (Ap y A1 respectivamente). El espesor promedio ponderado de los horizontes Ap varió entre 7.4 y 19.4 cm y los de A1 entre 7.2 y 24.4 cm. De cada horizonte se tomó un bloque de suelo de aproximadamente 30 cm de largo, 18 cm de ancho y 12 cm de espesor; sin embargo en aquellos sitios donde los horizontes fueron más delgados el espesor del bloque recolectado se redujo hasta los 7 cm. Los suelos se clasificaron taxonómicamente en los órdenes Inceptisol, Molisol, Vertisol, Alfisol y Ultisol (USDA, 2010) y se caracterizaron por presentar contenidos de carbono orgánico que variaron entre 8.61 y 34.01 g kg<sup>-1</sup>, de arcilla entre 240 y 674 g kg<sup>-1</sup>, limo entre 263 y 545 g kg<sup>-1</sup>, y arena entre 36 y 336 g kg<sup>-1</sup>. En el anexo H se encuentran las principales propiedades y características de los suelos estudiados.

### 2.4.3 Separación de los agregados de suelo

Como se observa en el diseño del experimento (Anexo I, parte 1), en total se recolectaron 182 bloques de suelo, 91 del horizonte superficial Ap y 91 del horizonte subsiguiente A1. En el laboratorio se procedió a separar en cada uno de los bloques los agregados por sus planos naturales de debilidad. Hecho esto, se sometieron los agregados a secado en invernadero durante 5 días a temperatura diurna promedio de 29°C. Posteriormente, se realizó un tamizado manual de

las muestras en conjunto de tamices (1, 2, 4.7, 9.5, 12.5, 19, 25, 35.70 y 50 mm) donde se encontró que predominaron cuatro rangos de tamaño de agregados: 2.0 a 4.79 mm, 4.80 a 9.49 mm, 9.50 a 19.00 mm y 19.01 a 35.70 mm. Los tamaños de agregados superiores a 19 mm están acordes con lo reportado por [Macks et al. \(1996\)](#) quienes utilizaron rango de tamaño de agregados hasta los 50 mm. De cada rango de tamaño se seleccionaron 10 agregados y de acuerdo con lo sugerido por [Guimarães et al. \(2009\)](#), se llevaron a secado final al horno a temperatura constante de 40°C durante 48 horas. El remanente de agua de los agregados luego del secado fue de 3.3% (2.0-4.79 mm), 3.4% (4.80-9.49 mm), 3,8% (9.50-19.00 mm) y 4.1% (19.01-35.70 mm) (Anexo G).

#### 2.4.4 Determinación del índice de friabilidad

El IF se estimó inicialmente a partir de la RR de cada agregado utilizando el  $CV_u$  propuesto por [Dexter y Watts \(2001\)](#). Para la medición de la RR se usaron 10 agregados de cada rango de tamaño, para un total de 3640 agregados por horizonte. Cada agregado fue sometido a compresión inconfiada en un equipo de carga para ensayos CBR (Soiltest - CF410) de dos velocidades, compuesto por dos platos paralelos entre los cuales los agregados fueron comprimidos. En cada uno de los ensayos, el plato inferior se levantó a una tasa de deformación constante de 0.07 mm s<sup>-1</sup> ([Watts y Dexter, 1998](#)). La RR se calculó a partir de la ecuación descrita por [Utomo y Dexter \(1981\)](#); [Dexter y Kroesbergen \(1985\)](#) y [Dexter y Watts \(2001\)](#):

$$RR = 0.576 (P/D_e^2) \quad (2.2)$$

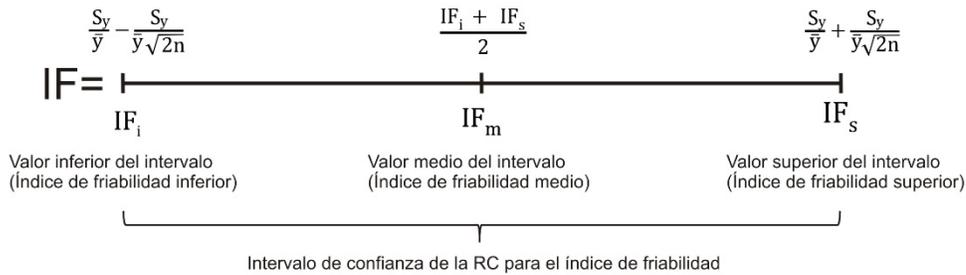
En la cual, RR (generalmente expresada en kPa) es la resistencia al rompimiento, P (N) el valor del pico de fuerza registrada al momento de la ruptura de los agregados y  $D_e$  (m) el diámetro efectivo de los agregados. El valor 0.576 corresponde a una constante de proporcionalidad.

A partir de la RR de cada agregado se estimó el IF mediante el  $CV_u$  propuesto por [Dexter y Watts \(2001\)](#):

$$(IF_i; IF_s) = \left( \frac{S_y}{\bar{y}} - \frac{S_y}{\bar{y}\sqrt{2n}}; \frac{S_y}{\bar{y}} + \frac{S_y}{\bar{y}\sqrt{2n}} \right) \quad (2.3)$$

donde se relaciona la desviación estándar de los valores medidos de la RR ( $s_y$ ) y la media de los valores medidos de la RR ( $\bar{y}$ ) para un tamaño de muestra  $n = 10$ . En esta ecuación ( $IF_i; IF_s$ ) representa los límites inferior y superior del índice de friabilidad.

Esta estimación se basa en el intervalo de confianza del  $CV_u$  de las medidas de la RR y presenta los siguientes componentes:



En muchas investigaciones en las que se estima el IF mediante el  $CV_u$ , el valor usualmente empleado es el correspondiente a la media del intervalo de confianza de la RR, es decir el índice de friabilidad medio ( $IF_m$ ).

La interpretación del IF en esta investigación se realizó a partir de la clasificación propuesta de [Imhoff et al. \(2002\)](#): no friable (<0.1), ligeramente friable (0.1-0.2), friable (0.2-0.5), muy friable (0.5-0.8) y mecánicamente inestable (>0.8). Estos rangos implican ciertas características en los suelos que se pueden observar en la Tabla 2-1.

**Tabla 2-1:** Clasificación de los suelos según el índice de friabilidad (IF) (a partir de los planteamientos hechos por [Imhoff et al., 2002](#) y [Macks et al., 1996](#)).

IF	Clasificación	Características
<0.1	No friable	Suelos con muy alta resistencia, por lo cual requieren muy alta energía para la labranza, que conlleva, entre otros, a emisiones considerables de gases efecto invernadero (GEI). Suelos de calidad física muy baja.
0.1-0.2	Ligeramente friable	Suelos con alta resistencia, por lo cual requieren alta energía para la labranza, que conlleva, entre otros, a emisiones considerables de GEI. Suelos de calidad física baja.
0.2-0.5	Friable	Suelos con moderada resistencia, por lo cual requieren moderada demanda de energía para la labranza. Suelos de calidad física moderada a alta.
0.5-0.8	Muy friable	Suelos con baja resistencia, por lo cual requieren baja energía para la labranza. Suelos de calidad física moderada.
>0.8	Mecánicamente inestable	Suelos con muy baja resistencia, por lo cual requieren muy baja energía para la labranza. Su calidad física puede considerarse baja, pero esto depende del manejo, dado que resultan aptos para siembra directa.

## 2.4.5 Análisis estadístico

El análisis de datos involucró los componentes descriptivo e inferencial (Anexo C). Las estadísticas descriptivas se refieren al promedio del IF y la RR por horizonte (Ap y A1) y por rangos de tamaño de los agregados (2.0 a 4.79 mm, 4.80 a 9.49 mm, 9.50 a 19.00 mm y 19.01 a 35.70 mm). Los promedios de los IF se acompañaron con los respectivos diagramas de líneas y de cajas para visualizar su distribución y detectar observaciones atípicas respectivamente. Además de la friabilidad univariante (para cada rango de tamaño de agregados), se estimó la medida del IF basado en el  $CV_m$  ([Albert and Zhang, 2010](#)), a partir de la matriz de varianzas y covarianzas de la

medida de la RR de todos los tamaños de agregados separados por horizonte. Adicionalmente se obtuvo el promedio marginal y conjunto para los horizontes y los tamaños de agregados. Para el componente inferencial se usó el modelado lineal de la friabilidad mediante un análisis de perfiles (Statistical Analysis System, v. 9.3), el cual, mediante el contraste de hipótesis secuenciales (Khattree y Naik, 2003) permitió obtener más información que la hipótesis usual asociada a la igualdad de promedios del IF. En principio se realizó para cada rango de tamaño de agregados la prueba de paralelismo en el análisis de perfiles y posteriormente las pruebas de coincidencia y horizontalidad. El análisis de perfiles se realizó igualmente para justificar la unión de los dos rangos de tamaño de agregados más pequeños (2.0 a 4.79 mm y 4.80 a 9.49 mm). Finalmente se construyó un diagrama de líneas por orden taxonómico de suelos para contrastar el comportamiento de la friabilidad en cada horizonte y tamaño de agregado.

## 2.5 Resultados y discusión

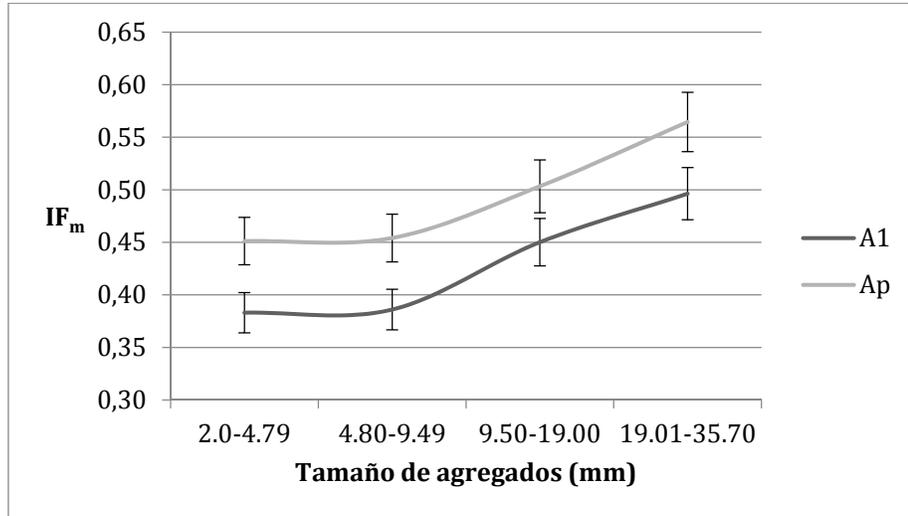
La Tabla 2-2 muestra los promedios del  $IF_m$  a partir del  $CV_u$  por horizonte y por rangos de tamaño de agregados. Los resultados muestran que los agregados de tamaño igual o inferior a 9.5 mm presentaron valores del  $IF_m$  muy similares en cada uno de los dos horizontes, mientras que a partir de los agregados de tamaño superior a 9.5 mm la friabilidad fue mayor, tanto en Ap como en A1. Es de resaltar que el valor del  $IF_m$  en el horizonte Ap es progresivamente mayor (entre 0.05 y 0.06 aproximadamente) con el aumento del tamaño de agregado, mientras que en A1 este incremento estuvo aproximadamente entre 0.04 y 0.07. En general, el análisis de perfiles del  $IF_m$  mostró cierto paralelismo y los valores de friabilidad del primer horizonte fueron superiores a los del subsiguiente (Tabla 2-2 y Figura 2-1); esto último coincide con lo encontrado por Watts y Dexter (1998) en suelos arcillosos y franco limosos del Reino Unido, en los que los agregados del horizonte superficial fueron más friables, atribuido esto a las tensiones de confinamiento adicionales de sobrecarga y a la menor influencia de la penetración de raíces en los agregados de los horizontes más profundos.

**Tabla 2-2:** Promedios del  $IF_m$  por horizonte y rangos de tamaño de agregado para los suelos bajo estudio.

Horizonte	Ap	A1	Ap y A1
Rango de tamaño			
2.0 a 4.79 mm	0.451	0.383	0.417
4.80 a 9.49 mm	0.454	0.386	0.420
9.50 a 19.00 mm	0.503	0.450	0.477
19.01 a 35.70 mm	0.565	0.496	0.530

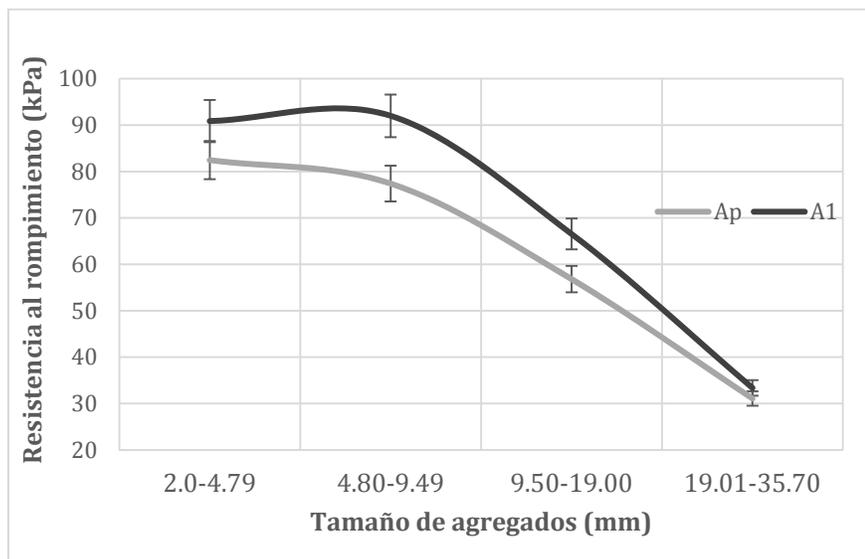
En la Figura 2-1 se evidencia el mayor valor del  $IF_m$  en ambos horizontes a partir del rango de tamaño de agregados de 9.5 mm, lo cual es coincidente con lo expresado por Dexter y Watts (2001), quienes encontraron que la resistencia y por lo tanto la friabilidad dependen del tamaño de los agregados, siendo más débiles los agregados más grandes debido a que contienen fisuras más grandes. Debido a la presencia de estas, los agregados grandes de una misma muestra comúnmente tienen una porosidad superior a la de agregados pequeños (Dexter, 1988b). De acuerdo con Schjønning et al. (2011), en general, el IF de los agregados naturales de suelos bien manejados es mayor al aumentar el tamaño de agregado.

**Figura 2-1:** Distribución del  $IF_m$  por horizonte para los diferentes rangos de tamaño de agregados.



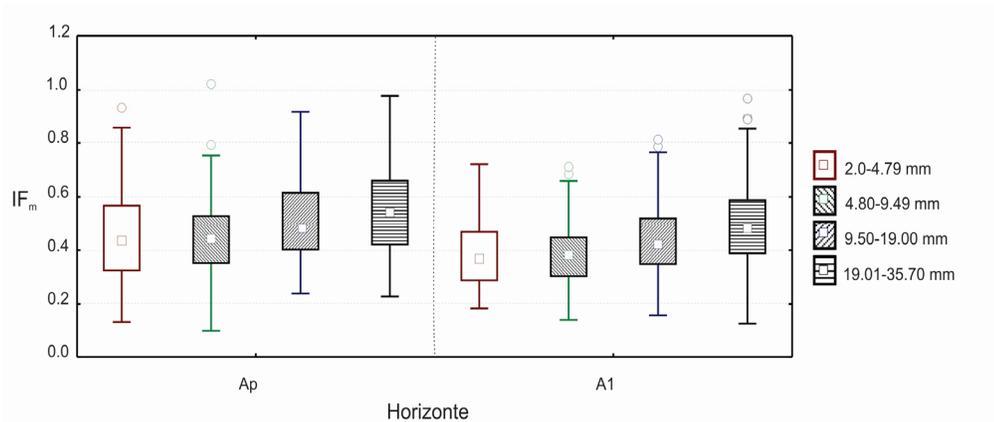
La Figura 2-2 permite evidenciar como la RR de los suelos bajo estudio presenta un comportamiento inverso al  $IF$ ; los agregados más pequeños (2.0-9.49 mm) registraron las más altas resistencias al corte con valores entre 77.4 y 92 kPa, mientras que en los de mayor tamaño (19.01-35.70) la RR fue más baja con valores entre 31.07 y 33.35 kPa. En general, se observa una disminución de la RR al aumentar el tamaño de los agregados tanto en el horizonte Ap como en A1 y una tendencia a presentar valores similares de RR en los agregados de mayor tamaño en los dos horizontes.

**Figura 2-2:** Distribución de la RR por horizonte para los diferentes rangos de tamaño de agregados.



La Figura 2-3 presenta visualmente los cuartiles inferior y superior, la mediana y el rango intercuartílico del promedio del  $IF_m$  para cada rango de tamaño de agregados en cada horizonte. Es de resaltar que para todos los tamaños considerados en el gran volumen de agregados utilizados, solo se encontraron observaciones aparentemente atípicas, que no fueron consideradas como extremas. Fue bastante clara la similaridad del rango intercuartílico en todos los grupos comparados, lo cual resultó conveniente para el requerimiento de homocedasticidad del IF por tratamiento (horizonte y rango de tamaño del agregado). En la misma figura se soporta la idea descriptiva de que la partición por rangos de tamaño de agregados no presentó diferencia en los agregados más pequeños (2.0 a 4.79 y 4.80 a 9.49 mm).

**Figura 2-3:** Índice de friabilidad medio ( $IF_m$ ) por horizonte para los diferentes rangos de tamaño de agregados.



La presencia de cuatro rangos de tamaño de agregados y dos horizontes permitió la construcción de una única medida de friabilidad multivariante por horizonte, basada también en la RR de los suelos. La medida multivariante tomó en cuenta las covarianzas de la RR por tamaño de los agregados y por horizonte, así como las correlaciones que pudieron existir en las medidas asociadas al tamaño de los agregados.

Para justificar la segregación por horizonte, se realizó un análisis de perfiles con la ayuda del SAS (Statistical Analysis System, v. 9.3). El análisis de perfiles también permitió evaluar de modo multivariante el comportamiento del IF en los cuatro rangos de tamaño trabajados.

En este estudio se encontró que la medida de friabilidad multivariante por horizonte y rango de tamaño de agregados presentó un valor muy cercano al  $IF_i$  del intervalo de confianza estimado mediante el  $CV_u$  (Tablas 2-3 y 2-4); esto sugiere que la evaluación univariante probablemente sobrestima el IF, teniendo presente que usualmente en la determinación de la friabilidad se utiliza el valor del  $IF_m$  (Imhoff et al., 2002; Dexter, 2004b; Tormena et al., 2008; Guimarães et al., 2009). En este sentido y para evitar una posible sobrestimación de la friabilidad, en esta investigación los cálculos del análisis de perfiles se realizaron con el límite inferior del intervalo de confianza ( $IF_i$ ) desarrollado por Dexter y Watts (2001).

**Tabla 2-3:** Índice de friabilidad multivariante y univariante en sus medidas inferior ( $IF_i$ ), media ( $IF_m$ ) y superior ( $IF_s$ ), segregado por horizonte para los suelos bajo estudio.

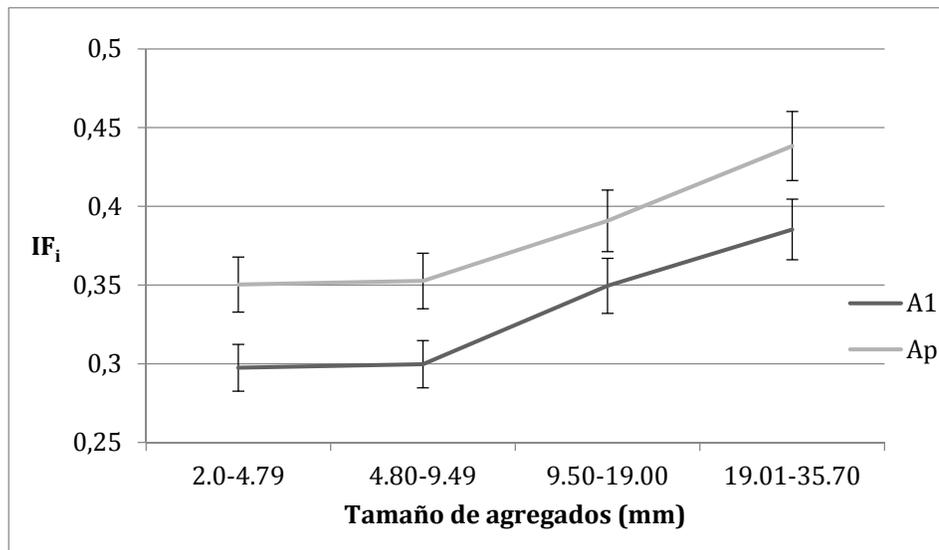
Enfoque	Horizonte	
	Ap	A1
Multivariante	<b>0.380</b>	<b>0.308</b>
Univariante, límite inferior intervalo de confianza de la RR ( $IF_i$ )	<b>0.395</b>	<b>0.347</b>
Univariante, valor medio intervalo de confianza de la RR ( $IF_m$ )	0.505	0.447
Univariante, límite superior del intervalo de confianza de la RR ( $IF_s$ )	0.625	0.545

**Tabla 2-4:** Índice de friabilidad multivariante y univariante en sus medidas inferior ( $IF_i$ ), media ( $IF_m$ ) y superior ( $IF_s$ ), segregado por tamaño de agregados en cada horizonte para los suelos bajo estudio.

Tamaño agregados (mm)	Medida univariante						Medida multivariante	
	Ap			A1			Ap	A1
	$IF_i$	$IF_m$	$IF_s$	$IF_i$	$IF_m$	$IF_s$		
2.0-9.49	0.38	0.48	0.60	0.32	0.42	0.51	0.40	0.32
9.50-19.00	0.39	0.50	0.62	0.35	0.45	0.55	0.54	0.44
19.01-35.70	0.44	0.56	0.69	0.39	0.50	0.61	0.40	0.38

La Figura 2-4 presenta la distribución del IF tomado del límite inferior del intervalo de confianza ( $IF_i$ ) propuesto por [Dexter y Watts \(2001\)](#). Estos valores resultan más conservadores y similares al valor multivariante de las tablas 2-3 y 2-4. El análisis de perfiles de la Figura 2-4 es equivalente al de la Figura 2-1, pero las delineaciones fueron trasladadas respecto del eje de las ordenadas un valor correspondiente al error estándar del  $CV_u$ , teniendo en cuenta que, en este caso, las medidas de friabilidad corresponden al  $IF_i$ .

**Figura 2-4:** Distribución del  $IF_i$  para cada horizonte en los diferentes rangos de tamaño de agregados.



El análisis de perfiles (Profile Analysis) para los cuatro rangos de tamaño de agregados permitió contrastar las hipótesis de paralelismo (hipótesis nula: ausencia de paralelismo), horizontalidad y coincidencia de los mismos. En el caso del paralelismo, el estadístico de prueba lambda de Wilks ( $\Lambda$ ) rindió una significancia de  $p=0,9233$  ( $p>5\%$ ), que permitió confirmar el paralelismo (en el análisis de perfiles) (Figura 2-4), lo que en la práctica significa que las diferencias en el  $IF_i$  para cada rango de tamaño de agregados se mantienen constantes. Así mismo, se confirmó la hipótesis de coincidencia ( $p<1\%$ ), indicando que las diferencias en el  $IF_i$  en cada horizonte son constantes (alrededor de 0.05), pero no nulas, es decir que cada horizonte se diferenció en la medida del  $IF_i$ . Finalmente se rechazó la hipótesis de horizontalidad ( $p<1\%$ ), lo que indica que no pueden considerarse iguales los promedios del  $IF_i$  para los cuatro rangos de tamaño de agregado dentro de un mismo horizonte.

Los dos tamaños de agregados más grandes presentaron mayor friabilidad (Figura 2-4) de manera similar a lo encontrado en la Figura 2-1, mostrando que a partir de tamaños de agregados mayores a los 9.5 mm los valores del  $IF_i$  fueron progresivamente superiores. Este comportamiento está asociado a suelos con moderada a alta friabilidad en los que la RR es alta en los agregados pequeños y baja en los agregados grandes (Macks et al., 1996).

Dada la similitud de los valores obtenidos en el  $IF_i$  de los dos rangos de tamaño de agregados más pequeños (2.0 a 4.79 mm y 4.80 a 9.49 mm), se realizó para estos un análisis de horizontalidad (análisis de perfiles) que rindió un  $p>5\%$ , confirmando así la horizontalidad de los mismos. Esto permitió agrupar estadísticamente el  $IF_i$  de estos dos rangos de tamaño en uno solo, basado en el promedio de las dos medidas segregadas por horizonte. Lo anterior, sugiere el uso de únicamente tres, de los cuatro rangos iniciales, para la determinación de la friabilidad de los suelos estudiados: 2.0 a 9.49 mm, 9.50 a 19.00 mm y 19.01 a 35.70 mm.

Para estimar el  $IF_i$  de cualquier tamaño de agregado en el rango entre 2.0 y 35.7 mm se ajustaron por mínimos cuadrados los modelos del  $IF_i$  para cada horizonte. En la tabla 2-5 se encuentra el modelo de mejor ajuste probado, su coeficiente de determinación  $R^2$  y la razón de cambio para cada horizonte:

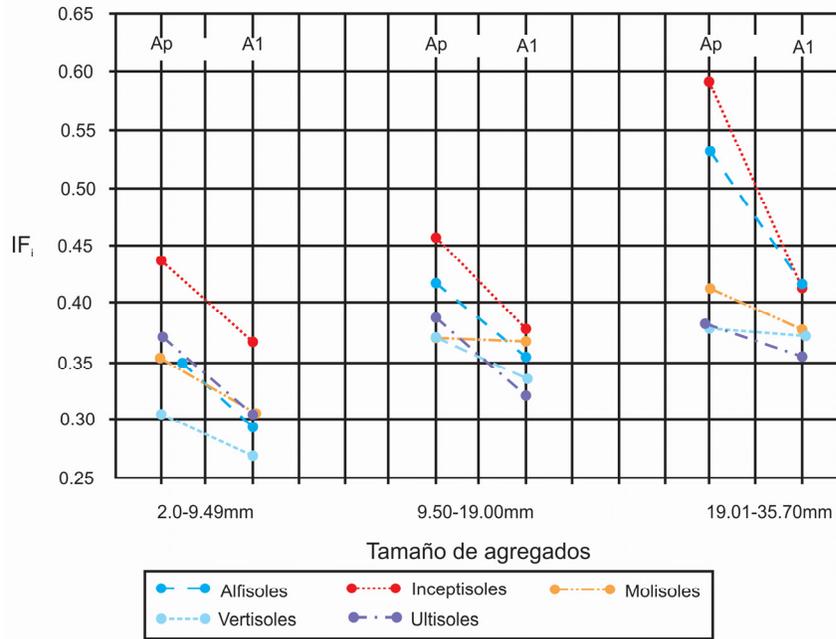
**Tabla 2-5:** Modelos para el  $IF_i$  de cada horizonte, coeficiente de determinación y razón de cambio por tamaño de agregado.

Modelo	$R^2$	Razón de cambio
$IF_{Ap}$ $= \sqrt{0.108292 + 0.003047 Ta}$	97.62	$d(IF_{Ap})/dT_a = 0.001524$ $/\sqrt{0.108292 + 0.003047 Ta}$
$IF_{A1}$ $= \sqrt{0.077553 + 0.002663 Ta}$	94.20	$d(IF_{A1})/dT_a = 0.001332$ $/\sqrt{0.077553 + 0.002663 Ta}$

Las razones de cambio son la primera derivada del  $IF_i$  para cada horizonte y permiten evaluar la velocidad instantánea del cambio del  $IF_i$  por horizonte para cada tamaño de agregado ( $Ta$ ) (Apostol, 1967); en este caso, estas razones se igualaron en el tamaño de agregado de 15.4 mm. Se halló también el lugar geométrico estimado que permite determinar la diferencia del  $IF_i$  de cada horizonte para un determinado tamaño de agregado usando la ecuación:  $IF_{Ap}^2 - IF_{A1}^2 = 0.030739 - 0.000384Ta$  (2.4). A partir de esta ecuación y considerando el paralelismo del análisis de perfiles, se puede hallar el  $IF_i$  de cualquier tamaño de agregado (entre los rangos probados) de un horizonte, mediante la medida del  $IF_i$  del otro horizonte.

Por otra parte, para evaluar el comportamiento de la friabilidad de cada uno de los tipos de suelos estudiados, se graficaron los valores del  $IF_i$  de los tres rangos de tamaño de agregado para los horizontes Ap y A1 (Figura 2-5). Todos los suelos variaron entre friables (0.2 – 0.5) y muy friables (0.5 – 0.8), de acuerdo con la clasificación ajustada de Imhoff et al. (2002) (Tabla 2-1). En general, los Inceptisoles registraron valores del  $IF_i$  más altos en relación con los demás órdenes, lo cual es deseable en los agregados grandes más no en los de menor tamaño, ya que esto indica mayor susceptibilidad a la degradación estructural y pérdida de suelo por erosión hídrica; lo anterior, se hace más evidente en el horizonte Ap de estos suelos (Tabla 2-6). Por otra parte se notó en los Alfisoles (especialmente en el horizonte A1) un decrecimiento del valor del  $IF_i$  con el tamaño de los agregados y valores de RR más altos en la medida que los agregados redujeron su tamaño, de tal forma que los agregados grandes pueden resultar más susceptibles al desmoronamiento que los más pequeños; esto en términos de labranza del suelo supone un menor gasto de energía, menor riesgo de degradación estructural y mayor facilidad en la preparación de una adecuada cama de siembra (Munkholm, 2011). El  $IF_i$  de los Ultisoles y Molisoles (especialmente en el horizonte Ap) presentó un comportamiento similar al reportado por Macks et al. (1996) en suelos australianos manejados con labranza convencional; en los que agregados grandes y pequeños presentaron poca variación en el valor de  $IF_i$ ; sin embargo, en este caso, en los órdenes referidos (que en general presentan valores bajos de RR), los agregados más grandes fueron ligeramente más resistentes que los de menor tamaño. Los agregados pequeños de los Vertisoles (2.0-9.5 mm) presentaron los  $IF_i$  más bajos y los más altos valores de RR, indicando una menor susceptibilidad de estos al desmoronamiento y pérdida de suelo por erosión hídrica. En general, los suelos estudiados presentaron mayores valores del  $IF_i$  en los agregados grandes, asociados a menores valores de RR y menores valores en los agregados pequeños, asociados a valores mayores de RR.

**Figura 2-5:** Valores del  $IF_i$  de los órdenes taxonómicos de suelos bajo estudio.



**Tabla 2-6:** Resistencia al rompimiento (kPa) de los diferentes tamaños de agregados para cada orden de suelo.

Tamaño agregados (mm)	Alfisolos		Molisolos		Vertisolos		Inceptisolos		Ultisolos	
	Ap	A1	Ap	A1	Ap	A1	Ap	A1	Ap	A1
2.0-9.49	83.29	103.36	69.14	80.85	103.86	107.79	29.97	59.98	69.95	75.63
9.50-19.00	61.69	79.12	51.78	58.39	75.21	80.93	20.77	44.26	39.65	45.91
19.01-35.70	29.81	34.98	26.06	31.62	34.17	36.28	19.43	35.04	24.27	28.48

## 2.6 Conclusiones

El enfoque multivariante resultó bastante útil para la selección de un valor más conveniente dentro del intervalo de confianza del  $CV_u$  de la RR propuesto por Dexter y Watts (2001). Se encontró que la medida multivariante para el IF fue muy cercana al límite inferior ( $IF_i$ ) de este intervalo de confianza; por lo tanto, en este trabajo el  $CV_m$  se usó como criterio para tomar el valor inferior del intervalo de confianza del  $CV_u$  como el que mejor representó el valor del IF de los suelos bajo estudio, en razón a la ganancia en precisión de las estimaciones realizadas con métodos multivariantes respecto de los univariantes.

A partir del importante volumen de muestras de suelo utilizadas en este trabajo, se comprobó el mayor valor del  $IF_i$  con el incremento del tamaño de los agregados en suelos de diferente tipología pero coincidentes en el tipo de cultivo. Se encontró que de los 4 rangos de tamaño de

agregados inicialmente separados por su dominancia en los suelos estudiados solo 3 fueron relevantes, en virtud de que los dos rangos de tamaño de agregados más pequeños presentaron estrecha cercanía en el valor del  $IF_i$ . Esto sugiere la necesidad de considerar por lo menos 3 rangos de tamaño de agregado (dominantes en el suelo) en la evaluación de la friabilidad.

Se encontraron diferencias en la friabilidad de los suelos con la profundidad; la friabilidad del suelo determinada en el horizonte Ap fue superior a la encontrada en el horizonte A1; sin embargo, el comportamiento del  $IF_i$  en los dos horizontes fue similar con respecto a la variación del tamaño de agregado, lo cual se demostró con pruebas estadísticas que indicaron paralelismo en el análisis de perfiles, no horizontalidad y no coincidencia de los mismos. Por lo anterior, la segregación de la medida de friabilidad por horizonte resultó relevante; lo cual confirma la necesidad de considerar los límites de los horizontes superficiales del suelo al momento de realizar el muestreo en campo con propósitos de evaluación de la friabilidad.

En este estudio se encontraron diferencias en el  $IF_i$  de algunos Alfisoles, Vertisoles, Molisoles, Ultisoles e Inceptisoles dedicados al mismo cultivo (caña de azúcar), mostrando los Alfisoles y Vertisoles la mejor condición de friabilidad y los Inceptisoles la menos favorable.

## 2.7 Agradecimientos

A la Universidad del Tolima, a COLCIENCIAS y a la Dirección de Investigaciones de la Universidad Nacional de Colombia por el apoyo económico; a los agricultores que facilitaron sus predios para realizar el muestreo de suelos; a CENICAÑA por el aporte de información y a los laboratorios de suelos de la Universidad Nacional de Colombia y del Instituto Geográfico Agustín Codazzi por el apoyo en la fase analítica de la investigación. Agradecemos también a los profesores Francisco José Martín Peinado y Lars J. Munkholm por sus comentarios en diferentes aspectos de la investigación.

## 2.8 Referencias

Albert, A., Zhang, L., 2010. A novel definition of the multivariate coefficient of variation. *Biometrical J.* 52, 667-675.

Apostol, T. M., 1967. *Calculus. One -variable Calculus, with an Introduction to Linear Algebra.* Second Edition. USA, 666 p.

Chan, K. Y., 1989. Friability of a hardsetting soil under different tillage and land use practices. *Soil Till. Res.* 13, 287-298.

Dexter, A.R., 1988a. Advances in characterization of soil structure. *Soil Till. Res.* 11, 199-238.

Dexter, A.R., 1988b. Strength of soil aggregates and of aggregate beds. *Catena Supplement* 11, 35-52.

Dexter, A.R., 2004b. Soil physical quality: Part II. Friability, tillage, tilth and hard-setting. *Geoderma* 120, 215–225.

Dexter, A.R., and Kroesbergen, B., 1985. Methodology for determination of tensile strength of soil aggregates. *J Agri. Eng. Res.* 31, 139–147.

Dexter, A.R., Watts, C.W., 2001. Tensile strength and friability. In: Smith, K.A., Mullins, C.E. (Eds.), *Soil and Environmental Analysis: Physical Methods*. Segunda edición. Marcel Dekker Inc, New York, pp. 405–433.

Guimarães, R.M.L., Tormena, C.A., Alves, S.J., Fidalski, J., Blainski, E., 2009. Tensile strength, friability and organic carbon in an oxisol under a crop-livestock system. *Sci Agri. (Piracicaba, Brasil.)* 66 (4), 499-505.

Imhoff, S., Da Silva, P.A., and Dexter, A.R., 2002. Factors contributing to the tensile strength and friability of Oxisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66, 1656-1661.

Kempen, B., Brus, D.J., Stoorvogel, J.J., 2011. Three-dimensional mapping of soil organic matter content using soil type-specific depth functions. *Geoderma* 162, 107–123.

Khattree, R. y Naik, D., 2003. *Applied Multivariate Statistics. With SAS Software*. Second edition. SAS Institute Inc. Cary, North Carolina. USA. 363p.

Macks, S.P., Murphy, B.W., Cresswell, H.P., and Koen, T.B., 1996. Soil friability in relation to management history and suitability for direct drilling. *Aus. J. Soil Res.* 34, 343-360.

Munkholm, L. J., 2011. Soil friability: A review of the concept, assessment and effects of soil properties and management (Review). *Geoderma* 167-168, 236–246.

Munkholm, L.J., and Kay, B.D., 2002. Effect of water regime on aggregate-tensile strength, rupture energy, and friability. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66, 702-709.

Munkholm, L.J., Schjønning, P., Kay, B.D., 2002a. Tensile strength of soil cores in relations to aggregate strength, soil fragmentation and pore characteristics. *Soil Till. Res.* 64, 125–135.

Munkholm, L.J., Schjønning, P., Debosz, K., Jensen, H.E., Christensen, B.T., 2002b. Aggregate strength and mechanical behaviour of a sandy loam soil under long-term fertilization treatments. *Eur. J. Soil Sci.* 53, 129–137.

Munkholm, L.J., Heck, R.J., Deen, B., 2012. Soil pore characteristics assessed from X-ray micro-CT derived images and correlations to soil friability. *Geoderma* 181-182, 22-29.

Rahimi, H., Pazira, E., Tajik, F., 2000. Effect of soil organic matter, electrical conductivity and sodium adsorption ratio on tensile strength of aggregates. *Soil Till. Res.* 54, 145-153.

Rencher, A.C., 2002. *Methods of Multivariate Analysis*. 2a ed. John Wiley & Sons. New York.

Schjønning, P., de Jonge, L. W., Munkholm, L. J., Moldrup, P., Christensen, B. T., Olesen, J. E., 2011. Clay dispersibility and soil friability – testing the soil clay – to carbon saturation concept. *Soil Sci. Soc. Am J. Vadose Zone J.* 11(1), 174-187.

Seben, G. de F., Corá, J. E., Fernández, C., Lal, R., 2013. Aggregate Shape and Tensile Strength Measurement. Technical Article. *Soil Sci.* 178 (6), 301-307.

Statistical Analysis System - SAS. 2009. SAS users guide; SAS/STAT – 9.3 (1) User's guide the GLM procedure (Book excerpt), SAS Campus Drive, Cary North Carolina Rv. 27513, 206 p.

Tormena, C.A., Araujo, M.A., Fidalsky, J., Imhoff, S., Da Silva, A.P., 2008. Quantification of tensile strength and friability of an Oxisol (Acrudox) under no-tillage. *Rev Bras. Cien. Sue.* 32 (3), 1-11.

USDA., 2010. Keys to Soil Taxonomy. United States Department of Agriculture. Soil Conservation Service, eleventh edition. Washington D. C, 365 p.

Utomo, W.H., Dexter, A.R., 1981. Soil friability. *J. Soil Sci.* 32, 203–213.

Watts, C.W., and Dexter, A.R., 1998. Soil friability: theory, measurement and the effects of management and organic carbon content. *Eur. J. Soil Sci.* 49, 73–84.

# Capítulo 3. Influencia de la mineralogía de arcillas, textura y contenido de carbono orgánico en el índice de friabilidad de suelos cultivados en caña de azúcar

Influence of clay mineralogy, texture, and organic carbon content on the friability index of soils cultivated with sugar cane

## 3.1 Resumen

La friabilidad es una propiedad física esencial en el manejo mecánico del suelo y su comportamiento está asociado a la naturaleza de otras propiedades edáficas, por lo tanto, requiere ser estudiada de manera integral con diferentes propiedades mineralógicas, físicas y químicas. El presente estudio evaluó el efecto del dominio de los minerales arcillosos tipo 1: 1 (caolinitas) y 2:1 (esmectitas y vermiculitas), la textura y el contenido de carbono orgánico (CO) sobre el índice de friabilidad (IF) de suelos cultivados en caña de azúcar. El IF se estimó a partir del coeficiente de variación univariante de la resistencia al rompimiento, tomando como referencia el límite inferior del intervalo de confianza ( $IF_i$ ). Se utilizaron 7280 agregados de los horizontes Ap y A1, tomados en 18 fincas localizadas en el Valle Geográfico del Río Cauca, Colombia. Los agregados fueron obtenidos de 182 bloques de suelo, posteriormente secados en invernadero y en horno a baja temperatura, segregados en tres tamaños y finalmente sometidos a compresión para determinar su resistencia al rompimiento (RR). Se determinó la mineralogía de la fracción arcilla a partir de difracción de rayos X, la distribución granulométrica por el método de la pipeta y el contenido de CO por el método de Walkley & Black. El análisis estadístico se realizó a partir de un enfoque descriptivo e inferencial univariante y multivariante que incluyó un análisis de covarianza para un diseño anidado en tres etapas. En este trabajo no se encontró efecto significativo de la dominancia de arcillas 1:1 y 2:1 cuando la variable respuesta fue el  $IF_i$ ; sin embargo, de manera descriptiva se observaron valores más altos del  $IF_i$  en suelos con dominio de arcillas 1:1. Los suelos de textura franco limosa (FL) exhibieron los valores más altos del  $IF_i$ , pero la menor condición de friabilidad, mientras que los de textura franco arcillo limosa (FARL) y arcillo limosa (ARL), por sus valores bajos del  $IF_i$  en los agregados pequeños y altos en los de mayor tamaño, presentaron la mejor condición de friabilidad. No se encontró efecto con nivel de significancia de las fracciones arcilla y limo total (FaT y FLT) sobre el  $IF_i$  de los suelos; por el contrario, la fracción arena total (FAT) y el contenido de CO presentaron efecto altamente significativo en el  $IF_i$ , encontrando valores más altos del  $IF_i$  en los suelos con mayores contenidos de CO y menores contenidos de

la FAT. El horizonte Ap con mayores contenidos de CO en relación con el A1, presentó a su vez los mayores valores del  $FI_i$  en cada tamaño de agregado.

**Palabras clave:** arcillas 2:1, arcillas 1:1, materia orgánica, resistencia al rompimiento, fracción arena.

### 3.2 Abstract

Friability is a physical property that is essential to the mechanical management of soil and its behavior is associated with the nature of other soil properties; therefore, it must be researched with integrated studies using different mineralogical, physical, and chemical properties. The present study evaluated the effect of the predominance of the clay mineral types 1:1 and 2:1, the texture, and the organic carbon content (OC) on the friability index (FI) of soils cultivated with sugar cane. The FI was estimated with the coefficient of variation of the tensile strength, using the lower limit of the confidence interval ( $FI_i$ ) as the reference. In total, 7280 aggregates from the Ap and A1 horizons were used, which were taken from 18 farms located in the Valle Geográfico del Río Cauca region, Colombia. The aggregates were obtained from 182 soil blocks, which were dried in a greenhouse and low-temperature oven, separated into three sizes, and, finally, subjected to compression to determine the tensile strength (TS). The mineralogy of the clay fraction was determined with x-ray diffraction, the granulometric distribution was determined by the pipette method, and the OC content was determined by the Walkley & Black method. The statistical analysis was conducted with a descriptive and inferential, univariate and multivariate, focus that included an analysis of covariance for a nested design with three stages. This study did not find a significant effect from the predominance of clays 1:1 and 2:1 when the response variable was  $Fli$ ; however, higher  $Fli$  values were observed in the descriptive approach in the soils with a predominance of clay 1:1. The sandy-loamy soils (SL) exhibited the highest  $FI_i$  values, but the lowest friability conditions. Meanwhile, the soils with a sandy-loamy-clay (SLC) or loamy-clay (LC) texture presented better friability conditions with low  $FI_i$  values in the small-sized aggregates and high  $FI_i$  values in the larger aggregates. There was not an effect with a significant level from the total silt and clay fractions (FTS and FTC) on the  $FI_i$  of the soils. On the other hand, the total sand fraction (FTSA) and the OC content presented highly significant effects on the  $FI_i$ , with higher  $FI_i$  values in the soils with higher OC contents and lower FTSA contents. The Ap horizon, which had high OC contents as compared to the AP horizon, presented the highest  $FI_i$  values for each aggregate size.

**Keywords:** clay 2:1, clay 1:1, organic material, tensile strength, sand fraction.

### 3.3 Introducción

La friabilidad es una propiedad física crucial en relación con la capacidad del suelo para soportar el crecimiento de la planta y para minimizar la energía requerida para la labranza (Munkholm, 2011). Cuando se hace un consumo eficiente de energía en la agricultura, especialmente en la labranza, se minimizan considerablemente los impactos ambientales y se reduce la degradación del suelo (Esengun et al., 2007; Sefeepari et al., 2014). La labranza intensiva y el exceso de mecanización han demostrado tener un efecto negativo sobre la fragmentación del suelo y la friabilidad (Munkholm, 2011). En este contexto, el conocimiento de la friabilidad, aplicando técnicas que permiten cuantificarla, como la medición de la RR, aporta información clave para el adecuado manejo de los suelos y el mejoramiento de su calidad física (Macks, 1996); la RR en particular, al estar controlada por microfisuras y grietas, es influenciada por la microestructura del suelo (Watts y Dexter, 1998). La friabilidad es una propiedad que depende de otras propiedades del suelo (Macks et al., 1996; Munkholm 2011, Schjónning et al., 2011; Munkholm et al., 2012). Varios autores coinciden en que las arcillas y el CO, ejercen influencia significativa en la resistencia al rompimiento y por lo tanto en la friabilidad del suelo (Barzegar et al., 1994, 1995; Macks et al., 1996; Watts y Dexter, 1998; Rahimi et al., 2000; Munkholm 2011, Schjónning et al., 2011).

Dexter (1988a), considera la arcilla y la materia orgánica (MO) pilares fundamentales de la estructura, que ejercen una gran influencia en la estabilidad de la misma; es por eso que el origen de la friabilidad del suelo puede ser entendido considerando la naturaleza de un suelo bien estructurado (Watts y Dexter, 1998). Las arcillas floculan formando dominios estables y junto con la MO actúan como material de unión entre las partículas minerales en la formación de la micro y macro estructura (Oades, 1984). Así mismo, la MO se puede alojar en los pequeños poros, creando vínculos entre las partículas e influyendo en la resistencia del suelo, especialmente en los agregados de mayor tamaño (Guérif, 1994). Sin embargo, Goldberg et al. (1990), sostienen que los compuestos orgánicos pueden ser adsorbidos sobre las arcillas modificando el equilibrio de las cargas eléctricas y disminuyendo la RR de los agregados del suelo.

Para Schjónning et al. (2009), bajos contenidos MO en los suelos agrícolas muestran problemas de calidad es estos, puesto que conduce a formación deficiente de estructura, lo cual a su vez conlleva a la disminución de la resistencia del suelo, particularmente en condiciones de alto contenido de agua, y genera un gran riesgo de dispersión de la arcilla. Para Schjónning et al. (2011), estos procesos de dispersión de arcilla originan movimientos de eluviación que deterioran la estructura del horizonte superficial del suelo. Barzegar et al. (1995) y Macks et al. (1996), sostienen que la resistencia del suelo y por lo tanto la friabilidad están influenciadas en gran medida por el tipo y cantidad de la fracción arcilla, los cationes intercambiables y la proporción de arcilla dispersable en el suelo. Munkholm et al. (2002a) y Munkholm y Kay (2002) indican que cuando hay dispersión de arcilla y el suelo se seca, la arcilla dispersa se endurece resultando un suelo con mayor dureza que aquel con mayor contenido de MO. Dexter et al. (2008) encontraron que la dispersibilidad de la arcilla aumenta con la cantidad de arcilla no complejada por el CO; en su trabajo experimental, determinaron que aproximadamente 10 g de arcilla se complejan con 1 g de CO. Varios estudios han demostrado que grandes cantidades de arcilla fácilmente dispersable puede aumentar la RR y reducir el IF en agregados

secos (Kay y Dexter, 1992), esto es debido probablemente a que la arcilla dispersa forma costras y superficies cementadas en el suelo cuando se seca (Schjønning et al., 2011).

Las asociaciones órgano-minerales relativamente estables pueden proporcionar una mayor resistencia a la ruptura física de los agregados del suelo con la labranza, especialmente en suelos de texturas finas (Jindaluang et al., 2013); es por esto que la estabilización de la MO ha sido relacionada con la textura y la mineralogía de las arcillas del suelo (Baldock y Skjemstad, 2000). El grado de descomposición y estabilización de la MO dentro de la fracción de tamaño menor de 2 mm del suelo, generalmente aumenta de mayor a menor tamaño de las partículas, es decir, arena < limo < arcilla (Christensen, 1992; Jindaluang et al., 2013). Así mismo, Bruun et al. (2010) mencionan que la capacidad de estabilización de la MO no es igual para todos los tipos de arcilla y sugieren que esta capacidad es mayor en las arcillas tipo 2:1 que en las 1:1 y decrece siguiendo la secuencia alófana> esmectita>illita>caolinita. En general, las arcillas tipo 1:1 y 2:1 son filosilicatos muy comunes en los suelos; las 1:1 (baja actividad), se caracterizan por presentar una estructura básica conformada por una lámina tetraédrica de cationes unidos covalentemente a los iones de oxígeno y una capa octaédrica, mientras que las 2:1 (alta actividad) están constituidas por una lámina octaédrica de cationes unidos covalentemente entre dos láminas tetraédricas (Barré et al., 2014).

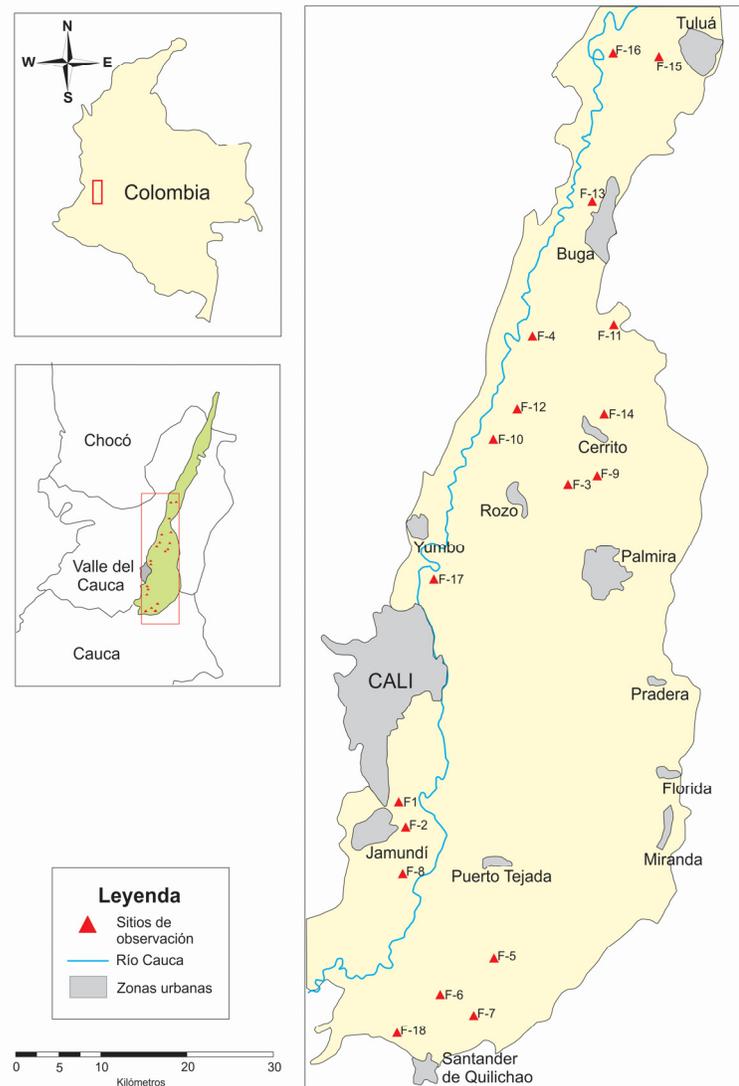
El objetivo de esta investigación es evaluar el efecto del dominio de los minerales arcillosos tipo 1:1 y 2:1, la textura y el contenido de carbono orgánico en el índice de friabilidad del suelo.

## 3.4 Materiales y métodos

### 3.4.1 Localización y características del área donde se localizaron los sitios de muestreo

En los departamentos del Valle del Cauca y Cauca (Figura 3-1), se localizaron 18 fincas cultivadas en caña de azúcar en las que se identificaron suelos con dominancia de arcillas tipo 1:1 y 2:1 en su capa arable. Los sitios fueron ubicados a partir de un estudio detallado de suelos del área cañera previamente realizado (IGAC, 2006). De acuerdo con la clasificación de zonas de vida de Holdridge, las fincas se localizaron en el bosque seco tropical (bs-T). La altitud en la que se localizaron los predios varía entre los 927 y 1011 m, la temperatura media anual entre los 22.7 y 23.5°C y la precipitación promedio entre 773 y 1542 mm anuales (Anexo B).

**Figura 3-1:** Localización de las fincas donde se realizó el muestreo de suelos (CENICAÑA, 2014).



### 3.4.2 Tipos de suelos y su localización en el paisaje

A partir del estudio detallado de suelos del sector donde se localizaron las fincas (IGAC, 2006) y mediante la confirmación de la descripción de los perfiles de suelo directamente en campo, se estableció que la clasificación taxonómica de los suelos estudiados correspondió a los órdenes Inceptisol, Molisol, Vertisol, Alfisol y Ultisol (USDA, 2010), caracterizados por ser bien a imperfectamente drenados, profundos a moderadamente profundos y con predominio de las fracciones arcilla y limo en su capa arable (Tabla 3-1). Estos suelos evolucionaron en clima ambiental cálido y seco, régimen de humedad ústico y régimen de temperatura isohipertérmico. Geomorfológicamente se localizaron dentro de la planicie aluvial del Río Cauca, distribuidos en terrazas bajas (Inceptisoles), medias (Molisoles y Vertisoles) y altas (Alfisolos y Ultisoles), especialmente localizados en los planos de terraza (bancos bien drenados) y unos pocos, Vertic Endoaqualfs y Typic Endoaquerts, en pequeños bajos

imperfectamente drenados (IGAC, 2006). Estos suelos se han originado predominantemente de sedimentos aluviales finos y medios transportados por las corrientes fluviales del sector. La topografía de las fincas en general presenta una pendiente dominante en el rango 1-3%. Los contenidos de CO (promedio ponderado por el espesor de los 5 horizontes Ap y A1 muestreados en cada finca) oscilaron entre 10.7 y 24.4 g kg<sup>-1</sup> en el horizonte Ap y entre 10.4 y 23.6 g kg<sup>-1</sup> en el horizonte A1. De acuerdo con Eggleston et al. (2014) y Turmel et al. (2014), estos contenidos, considerados en general medios a bajos, obedecen generalmente a la incorporación de los residuos de cosecha de los mismos cultivos, con lo que se recicla gran parte de los nutrientes de la parte aérea de la planta, se mantienen los niveles de MO y se mejora el estado de agregación del suelo.

**Tabla 3-1:** Principales propiedades de los suelos bajo estudio.

Finca No	Taxonomía de los suelos (subgrupo)	Arena pond. (gkg <sup>-1</sup> ) (Ap-A1)	Limo pond. (gkg <sup>-1</sup> ) (Ap-A1)	Arcilla pond. (gkg <sup>-1</sup> ) (Ap-A1)	Dominancia de minerales arcillosos (% semicuantitativo) (Ap-A1)	Carbono orgánico pond. (gkg <sup>-1</sup> ) Ap	Carbono orgánico pond. (gkg <sup>-1</sup> ) A1
F-1	Udertic HaplustalFs	85.0	320.4	594.6	+++	24.4	21.9
F-2	Vertic EndoaqualFs	154.0	345.0	501.0	+++	18.8	18.3
F-3	Vertic Haplustolls	245.0	424.0	331.0	***	18.8	18.3
F-4	Typic Calciusterts	153.7	345.3	501.0	***	23.8	18.4
F-5	Typic Palehumults	140.0	288.4	571.6	+++	19.7	18.7
F-6	Typic Palehumults	80.8	263.2	656.0	+++	24.0	23.6
F-7	Vertic HaplustalFs	108.3	395.9	495.8	+++	19.3	18.1
F-8	Udertic HaplustalFs	36.2	289.1	674.7	+++	20.2	17.8
F-9	Typic Haplustolls	176.6	509.0	314.4	***	21.9	18.4
F-10	Typic Haplustepts	214.7	545.1	240.2	+++	12.8	11.1
F-11	Vertic Haplustolls	150.2	425.8	424.0	***	15.8	14.5
F-12	Petrocalcic Haplusterts	209.4	434.6	356.0	***	19.3	14.9
F-13	Entic Haplusterts	76.8	287.1	636.1	***	20.0	18.3
F-14	Entic Haplustolls	290.5	364.0	345.5	***	14.4	11.8
F-15	Entic Haplusterts	336.0	328.5	335.5	***	10.7	10.4
F-16	Typic Endoaquerts	219.8	386.2	394.0	***	15.3	14.5
F-17	Entic Haplustolls	301.8	392.8	305.4	***	15.9	15.4
F-18	Typic Palehumults	125.6	385.8	484.6	+++	16.3	15.8

+++ Dominio arcilloso 1:1 (caolinita > 40%, con minerales asociados: metahalosita, cuarzo, gibsita, hidróxidos de hierro, cristobalita e intergradados-interestratificados). \*\*\* Dominio arcilloso 2:1 (esmectita y vermiculita > 40%, con minerales asociados: micas, clorita y anfiboles). Pond. (ponderado).

### 3.4.3 Muestreo de suelos

A partir de la información consignada en el estudio detallado de suelos, en cada finca se identificó el perfil modal de interés (tipo específico de suelo) y dentro de los límites del mismo, se ubicaron 5 sitios de observación y muestreo (excepto en la primera finca en la cual se seleccionaron 6 sitios), distantes entre sí aproximadamente 100 m. En cada sitio de observación se abrieron cajuelas de 50 x 50 cm de lado y 50 cm de profundidad en las que se delimitaron el horizonte superficial (Ap) y el subsiguiente (A1). De manera independiente para cada horizonte se realizó el muestreo de suelos que incluyó la toma de bloques de suelo (30 x 18 cm de lado y 12 cm de espesor aproximadamente) necesarios para la obtención de los agregados del suelo. En el anexo I (parte 1) se puede observar el diseño experimental utilizado.

### 3.4.4 Preparación de las muestras de suelo para las pruebas de compresión

Se recolectaron 182 bloques de suelo (91 de cada horizonte), a partir de los cuales se realizó cuidadosamente en el laboratorio la separación de agregados de forma manual, aprovechando para ello los planos de debilidad natural del suelo. Estos agregados se secaron en invernadero durante 5 días a temperatura promedio diurna de 29°C. Posteriormente, mediante juego de tamices, se separaron los agregados por tamaño en cuatro rangos que resultaron dominantes en el fraccionamiento: 2.0 a 4.79 mm, 4.80 a 9.49 mm (estos dos tamaños se agruparon conformando uno solo), 9.50 a 19.00 mm y 19.01-35.70 mm. De cada rango se seleccionaron 10 agregados, los que de acuerdo con la metodología de [Guimarães et al. \(2009\)](#), fueron llevados al horno para secado final a 40°C durante 48 horas. Las muestras se almacenaron posteriormente en recipientes plásticos herméticos para evitar ganancia de humedad del ambiente hasta el momento en que fueron llevados a la prueba de compresión.

### 3.4.5 Determinación de la resistencia al rompimiento e índice de friabilidad

Se obtuvieron en total 7280 agregados, 40 de cada horizonte muestreado (10 de cada rango de tamaño), los cuales se pesaron individualmente y de la misma forma se sometieron al ensayo de compresión en un equipo CBR (Soiltest - CF410) de dos velocidades, integrado por un par de platos paralelos entre los cuales los agregados fueron comprimidos. En cada ensayo se aplicó esfuerzo a una tasa de deformación constante de 0.07 mm s<sup>-1</sup> ([Watts y Dexter, 1998](#)). La RR se calculó a partir de la ecuación descrita por [Utomo y Dexter \(1981\)](#) y [Dexter y Kroesbergen \(1985\)](#):

$$RR = 0.576 (P/D_e^2) \quad (3.1)$$

donde RR es la resistencia al rompimiento (generalmente expresada en kPa), P el pico de fuerza al momento de la ruptura del agregado (N) y D<sub>e</sub> el diámetro efectivo de cada agregado (m). El valor 0.576 corresponde a una constante de proporcionalidad.

El IF se estimó considerando el coeficiente de variación univariante propuesto por [Dexter y Watts \(2001\)](#), dando especial importancia a su límite inferior  $IF_i$ :

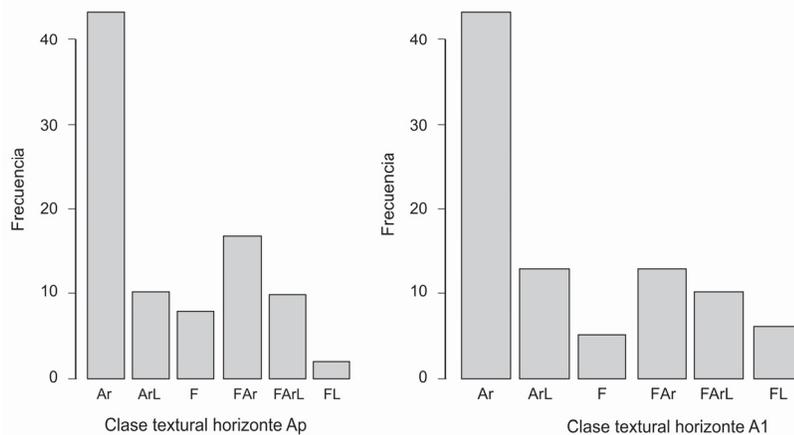
$$(IF_i; IF_s) = \left( \frac{S_y}{\bar{y}} - \frac{S_y}{\bar{y}\sqrt{2n}}; \frac{S_y}{\bar{y}} + \frac{S_y}{\bar{y}\sqrt{2n}} \right) \quad (3.2)$$

donde,  $S_y$  es la desviación estándar de los valores medidos de RR (kPa),  $\bar{y}$  es la media de las medidas de RR y, n, el número de réplicas, que en este caso correspondió a 10 agregados.

### 3.4.6 Separación de las fracciones arcilla, limo y arena

Para el fraccionamiento de partículas minerales de tamaño inferior a 2 mm, inicialmente se llevó a cabo la eliminación de agentes cementantes naturales del suelo como materiales orgánicos, carbonatos, sales y óxidos (método de la pipeta) ([American Society of Agronomy, 2002a](#); [IGAC, 2006a](#)). Posteriormente mediante procesos de dispersión y tamizado en húmedo se logró aislar las fracciones arena muy gruesa (2-1 mm), arena gruesa (1-0.5 mm), arena media (0.5-0.25), arena fina (0.25-0.1 mm) y arena muy fina (0.1-0.05 mm). De acuerdo con [Barré et al. \(2014\)](#), la fracción arcilla del suelo normalmente se separa por sedimentación o centrifugación; en este trabajo, las fracciones limo grueso (0.05-0.02 mm), limo fino (0.02-0.002 mm) y arcilla (< 0.002 mm) se obtuvieron a partir de procesos de dispersión, agitación, sedimentación y toma de alícuotas en diferentes periodos de tiempo. En los suelos estudiados hubo predominio de las clases texturales arcillosa, franco arcillosa y arcillo limosa. (Figura 3-2).

**Figura 3-2:** Clases texturales de los horizontes Ap y A1 de los suelos bajo estudio.



Ar: arcillosa, ArL: arcillo limosa, F: franca, FAr: franco arcillosa, FArL: franco arcillo limosa y FL: franco limosa.

### 3.4.7 Análisis de arcillas por difracción de rayos X y determinación del carbono orgánico

Aislada la fracción arcilla de las 182 muestras, cada una fue sometida a cuatro tratamientos con cationes en solución antes de ser llevadas al equipo de difracción de rayos X (DRX): i) solución de arcilla saturada con  $MgCl_2$  1N; ii) solución de arcilla saturada con  $MgCl_2$  1N y

C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O<sub>2</sub>; iii) solución de arcilla saturada con KCl 1N; y iv) solución de arcilla saturada con KCl 1N, seca al aire y posteriormente calentada a 550°C. Esta técnica de identificación ([American Society of Agronomy, 2002a](#); [IGAC, 2006a](#)) utiliza los tratamientos mencionados para identificar, mediante la difracción de rayos X, el comportamiento diferencial de los minerales de la fracción arcilla a partir de la saturación con los diferentes cationes (magnesio y potasio), las moléculas de etilenglicol y el calentamiento a 550°C. El proceso de DRX para cada muestra se realizó durante un tiempo aproximado de 7 minutos en un equipo Panalytical Empyrean serie 2 - 2010, con velocidad de barrido 2°T x minuto. El barrido de cada muestra se realizó entre los ángulos 2° y 40°T. En relación con el CO, este se determinó en el suelo mediante el procedimiento de digestión vía húmeda de Walkley & Black ([American Society of Agronomy, 2002b](#); [IGAC, 2006a](#)).

### 3.4.8 Análisis estadístico

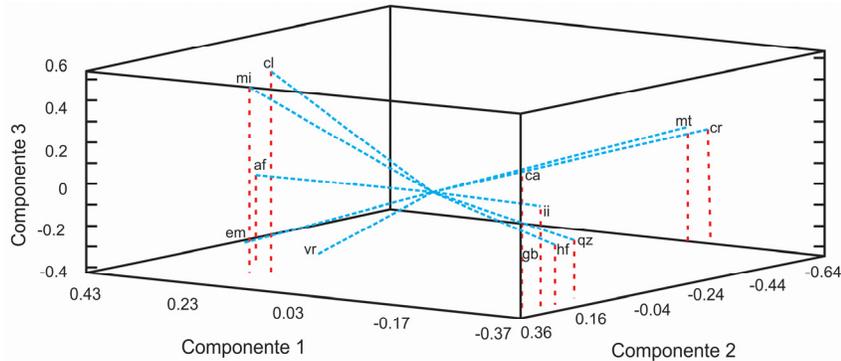
El análisis estadístico involucró el componente descriptivo e inferencial (Anexo D) con enfoques univariante y multivariante. Se realizó un análisis de componentes principales (ACP) para caracterizar la dominancia mineral presente en la fracción arcilla a partir de la visualización del diagrama de sedimentación con valores propios superiores a la unidad. Se identificó el dominio de minerales arcillosos tipo 1:1 y 2:1 y se construyó el diagrama tridimensional de los pesos de los tres primeros componentes para representar con mayor claridad la dominancia del tipo de arcilla. A partir del componente descriptivo se generaron los niveles del factor de clasificación asociado a la dominancia, luego de lo cual se realizó un análisis de covarianza (Statistical Analysis System, v. 9.3) para un diseño anidado en tres etapas, teniendo como covariables al CO y la FAT (fracción arena total), pues las covariables FaT (fracción arcilla total), FLT (fracción limo total) y los diferentes tamaños de la fracción arena, no cumplieron los supuestos necesarios para permanecer en el modelo. La variable respuesta fue el IF<sub>i</sub>, por lo que se generaron 36 combinaciones de niveles de los factores tamaño de agregado, tipo de horizonte y textura, ya que la dominancia de arcillas 1:1 y 2:1 se eliminó del modelo al no tener efecto significativo. Se calcularon estadísticas descriptivas (media y coeficientes de variación) para el IF<sub>i</sub>, los promedios de CO y la FAT, cada uno de ellos por tamaño de agregado (2 a 9.49, 9.50 a 19.00 y 19.01 a 35.70 mm), horizonte morfogénico (Ap y A1) y textura (Ar, ArL, F, FAr, FArL y FL).

## 3.5 Resultados y discusión

Algunos estudios previos que han relacionado la influencia de minerales de arcilla tipo 1:1 y 2:1 con la RR fueron trabajados con agregados remoldeados ([Barzegar et al., 1995](#)). En esta investigación se puso a prueba el efecto de la dominancia de estos minerales en el IF<sub>i</sub> de agregados naturales del suelo. La Figura 3-3 presenta los tres componentes extraídos del ACP, los cuales explicaron un 63% de la variabilidad encontrada en los datos. En la dirección del componente uno se encontró la información de mayor interés para la segregación de la dominancia del tipo de arcillas 1:1 o 2:1. Los valores con pesos positivos correspondieron a los minerales esmectita(em) y vermiculita(vr) (en más del 40% de abundancia), que se asociaron con minerales como micas(mi), clorita (cl) y anfíboles (af), los cuales se agruparon en el conjunto de arcillas del tipo 2:1; mientras que los pesos negativos para este componente correspondieron a caolinita (ca) (en más del 40% de abundancia), asociada con metahalosita (mt), cuarzo (qz), gibsita (gb), hidróxidos de hierro (hf), cristobalita (cr) e intergradados-

interestratificados (ii), conformando este el dominio de arcillas tipo 1:1. Esta segregación permitió clasificar cada una de las observaciones, según las cargas del componente, a alguno de los dos tipos de dominio, de tal forma que de este análisis se conformó un factor de clasificación de dos niveles relacionado con la dominancia (1:1 y 2:1), que fue incluido en el análisis inferencial.

**Figura 3-3:** Diagrama tridimensional de los pesos de los componentes extraídos del análisis de componentes principales para las variables minerales de la fracción arcilla.



En la Tabla 3-2 se resume el análisis de covarianza en la que se observa como el efecto de la dominancia de arcillas 1:1 y 2:1 no resultó significativo ( $p > 5\%$ ). En esta Tabla se encuentran también los resultados del análisis en un modelo reducido con aquellas variables de efectos no nulos desde el punto de vista estadístico, en el que se encontró que las covariables CO y FAT resultaron altamente significativas en el ajuste del modelo ( $p < 1\%$ ), al igual que el tipo de horizonte morfogénico ( $p < 1\%$ ), la textura anidada en el horizonte ( $p = 0.0060$ ) y el tamaño de los agregados anidado en el efecto conjunto del horizonte y la textura ( $p < 1\%$ ). El tipo de diseño no permitió las pruebas de comparaciones de medias (debido al anidamiento de factores y a la falta de significancia en el caso del factor cruzado), sin embargo, se realizaron los promedios ajustados por mínimos cuadrados para las variables involucradas en el modelo, así como los promedios observados del  $IF_i$  para la dominancia de las arcillas, pues este aspecto se consideró relevante en este trabajo aun encontrando su efecto no significativo en el modelo ajustado.

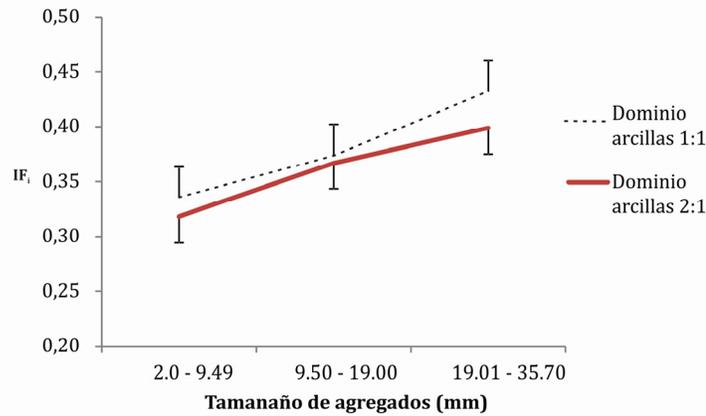
**Tabla 3-2:** Análisis de covarianza para el diseño anidado en tres etapas.

Fuente	gl	Suma de cuadrados (IV)	cuadrado medio	Cociente F	Pr > F
Horizonte morfogénico	1	0.2768	0.2768	24.10	<0.0001
Textura (horizonte)	10	0.2880	0.0288	2.51	0.0060
Tamaño agregado (horizonte*Textura)	24	0.8433	0.0351	3.06	<0.0001
FAT	1	0.1526	0.1526	13.29	0.0003
CO	1	0.0898	0.0898	7.82	0.0054
Dominancia de arcillas 1:1 y 2:1	1	0.0015	0.0015	0.13	0.7136
Error	504	5.7898	0.0114		
Total	542	7.6015			

FAT: fracción arena total; CO: carbono orgánico

Aunque el efecto de la dominancia de arcillas no mostró significancia según la Tabla 3-2, resultó de interés destacar cómo de manera descriptiva (Figura 3-4), el análisis de perfiles mostró que a medida que se hizo mayor el tamaño del agregado, mayor fue también el  $IF_i$  en cada una de las dominancias de arcilla; a este respecto y de acuerdo con [Schjónning et al. \(2011\)](#), en general, la RR de los agregados naturales de suelos bien manejados, disminuye al aumentar el tamaño de agregado y se incrementa la friabilidad. El  $IF_i$  de los suelos con dominio de arcillas 1:1 fue superior en todos los tamaños, lo cual coincide con lo reportado por [Barzegar et al. \(1995\)](#), en Alfisoles y Vertisoles Australianos, en los que las arcillas esmectíticas, con alta capacidad de intercambio catiónico y tamaño fino ( $<0.02 \mu\text{m}$ ), presentaron una mayor resistencia que aquellos con dominio de caolinitas e illitas, lo cual en términos de friabilidad, indica un mayor IF en suelos con dominio de arcillas 1:1 con respecto a los de dominio 2:1. Se encontró también que en los agregados de mayor tamaño (rango entre 19.01 y 35.70 mm), el valor del  $IF_i$  de los dos dominios arcillosos mostró la mayor diferencia. De acuerdo con [Guérif \(1994\)](#), la MO puede disponerse en el espacio poroso de menor tamaño fortaleciendo el vínculo entre las partículas minerales, incrementando su RR y disminuyendo su friabilidad; especialmente en los agregados de mayor tamaño. En la presente investigación, este postulado parece explicar los valores más bajos del  $IF_i$  en los suelos con dominio de arcillas tipo 2:1, principalmente en los agregados grandes, por la mayor capacidad de estabilización de la MO reportado en estas arcillas ([Bruun et al., 2010](#)).

**Figura 3-4:** Análisis de perfiles del  $IF_i$  por tipo de dominio arcilloso y tamaño de los agregados. (Las barras en cada perfil indican el error estándar de la media del  $IF_i$ ; uno positivo y uno negativo solo para evitar el solapamiento de las barras).



En este trabajo no se encontró efecto con nivel de significancia de la dominancia de arcillas tipo 1:1 y 2:1 en el  $IF_i$  de los suelos estudiados, no obstante, otros investigadores han demostrado la influencia de algunos óxidos en la friabilidad del suelo. En su trabajo experimental con Oxisoles del trópico, [Imhoff et al. \(2002\)](#) encontraron que óxidos de Fe y Si correlacionaron negativamente con la friabilidad, mientras que por el contrario la relación con formas cristalinas de Fe fue positiva. La relación negativa con los óxidos de Fe y Si fue explicada a partir de la acción cementante de estos constituyentes, pues se consideró que altos contenidos de estas formas minerales incrementaban la resistencia del suelo y reducían la friabilidad.

Con relación a la textura, la influencia de esta propiedad en la friabilidad del suelo no ha sido aun bien establecida. En este sentido, [Macks et al. \(1996\)](#) reportaron una pobre correlación entre textura y friabilidad en Alfisoles y Oxisoles Australianos, lo cual fue atribuido a la heterogeneidad textural de los suelos estudiados. Contrario a esto, [Imhoff et al. \(2002\)](#) no encontraron ninguna correlación entre estas dos variables trabajando en Oxisoles del trópico. En la presente investigación, se relacionó el  $IF_i$  con los contenidos de arcilla, limo y arena del suelo y se encontró que en el caso de las fracciones arcilla y limo total, no hubo ningún efecto sobre los valores del  $IF_i$ . Lo anterior, de acuerdo con [Barzegar et al. \(1995\)](#), puede atribuirse al hecho de que aunque las arcillas están implicadas en la unión o cementación de las partículas del suelo, cuando estas son floculadas y agregadas por los iones de calcio y MO, esta función de unión o cementación se ve ampliamente reducida y la FaT puede no reflejar la resistencia y por consiguiente, la friabilidad del suelo. Contrario a lo observado con la FaT y la FLT en la presente investigación, la FAT mostró un efecto altamente significativo sobre el  $IF_i$  en el modelo estadístico ajustado (Tabla 3-2). El promedio general de esta fracción presentó un porcentaje ligeramente superior en el horizonte Ap (17.55%), en relación con el horizonte A1 (16.35%).

En general, los suelos de textura FL presentaron los valores más altos del  $IF_i$  en todos los tamaños de agregados, tanto en Ap, como en A1 (Tabla 3-3), siendo más marcada esta diferencia, en relación con las otras clases texturales, en el horizonte Ap; sin embargo, el presentar altos valores del  $IF_i$  tanto en los agregados pequeños como en los grandes los hace suelos de baja condición de friabilidad, ya que los pequeños agregados, por su baja resistencia son altamente susceptibles a la degradación estructural, aun siendo sometidos a labranza reducida. Por el contrario, los suelos con texturas FArL y ArL presentaron mejor condición de friabilidad, ya que los agregados pequeños registraron valores bajos del  $IF_i$  (mayor resistencia) y los agregados grandes valores más altos del  $IF_i$  (menor resistencia), por lo que se facilita la fragmentación de grandes terrones o unidades estructurales en pequeños agregados óptimos para la siembra y resistentes a la degradación.

**Tabla 3-3:** Distribución de los promedios (celda superior) y el coeficiente de variación (celda inferior) del  $IF_i$  por horizonte, textura y tamaño del agregado.

Tamaño agregados	Horizonte	Textura					
		Ar	ArL	F	FAr	FArL	FL
2 a 9.49 mm	Ap	0.36 (29.00)	0.33 (23.05)	0.38 (29.44)	0.33 (31.07)	0.36 (18.45)	0.45 (22.61)
	A1	0.30 (23.62)	0.31 (20.81)	0.29 (9.60)	0.28 (25.25)	0.28 (39.34)	0.35 (26.87)
9.50 a 19.00 mm	Ap	0.41 (29.29)	0.37 (33.70)	0.37 (24.56)	0.36 (26.86)	0.38 (24.50)	0.48 (9.62)
	A1	0.35 (35.30)	0.35 (30.33)	0.35 (31.81)	0.34 (15.49)	0.34 (24.61)	0.37 (39.50)
19.01 a 35.70 mm	Ap	0.40 (29.75)	0.50 (30.90)	0.42 (30.18)	0.38 (35.96)	0.45 (32.31)	0.61 (23.16)
	A1	0.40 (30.29)	0.38 (41.60)	0.29 (18.06)	0.39 (27.47)	0.37 (19.61)	0.42 (37.55)

Ar: arcillosa, ArL: arcillo limosa, F: franca, FAr: franco arcillosa, FArL: franco arcillo limosa, FL: franco limosa.

De otra parte, con relación a la MO, cuyo papel en la agregación ha sido ampliamente estudiado, no se ha comprobado aun un efecto claro de esta variable en el IF de los suelos. De acuerdo con lo expresado por [Jindaluang et al. \(2013\)](#), quienes sostienen que una mayor RR puede ser asociada con compuestos órgano-minerales con cierto grado de estabilidad, se considera necesario analizar el CO del suelo en el contexto de las fracciones minerales que lo acompañan. La Tabla 3-4 muestra la distribución del promedio de dos variables que mostraron efectos altamente significativos sobre el IF<sub>i</sub> en la presente investigación: el CO (valor superior en la celda de la tabla) y la FAT (valor inferior). Si bien en el horizonte Ap se encontraron los mayores valores de CO, en ambos horizontes los contenidos más altos estuvieron asociados a las texturas arcillosa (Ar), arcillo limosa (ArL) y franco arcillo limosa (FARL), con valores alrededor de entre 17 y 20 g Kg<sup>-1</sup>. Los valores más bajos de CO pertenecieron en ambos horizontes a los suelos con texturas franca (F) y franco limosa (FL), con valores próximos a 12 g kg<sup>-1</sup>. Lo anterior parece tener explicación en la mayor capacidad de estabilización de la MO por parte de la fracción arcilla, ([Christensen, 1992](#); [Jindaluang et al., 2013](#)), tal y como se encontró en este estudio donde los mayores contenidos de CO están asociados a la fracción más fina. Así mismo, en lo que respecta a la FAT, los valores superiores se correspondieron con los valores más bajos de CO, siendo estos, los suelos francos (F) y franco limosos (FL).

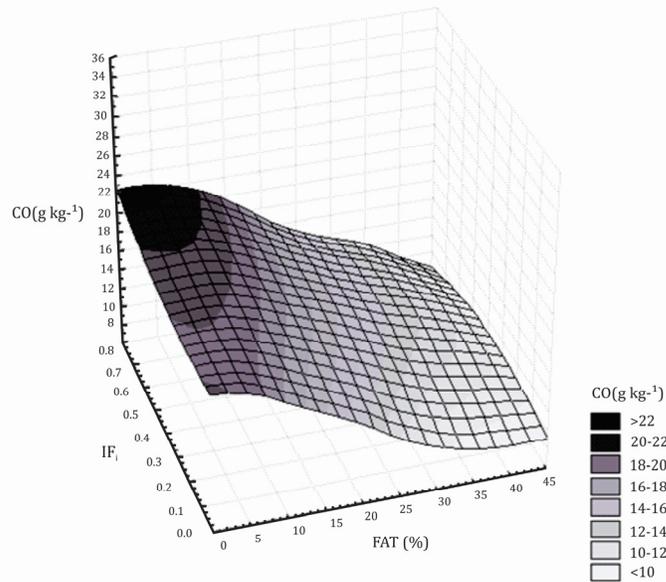
**Tabla 3-4:** Distribución de los promedios de CO (g Kg<sup>-1</sup>) (valor superior) y FAT (%) (valor inferior) por horizonte y textura.

Horizonte	Textura					
	Ar	ArL	F	FAr	FARL	FL
Ap	20,00	20,54	12,39	15,50	19,95	12,58
	11.90	12.43	36.89	28.10	14.76	21.93
A1	18,64	17,20	11,10	13,56	17,76	12,44
	11.69	11.40	36.48	27.06	16.45	17.94

La Figura 3-5 complementa la descripción tabular dada hasta el momento, en ella se representa la superficie generada por las variables CO, FAT e IF<sub>i</sub>. Es claro que a mayor FAT se encuentran los valores más bajos de CO para todo el rango del IF<sub>i</sub>, mientras que la mayor friabilidad (IF<sub>i</sub>>0.5) corresponde a los más altos contenidos de CO (> 22 g kg<sup>-1</sup>) y a los valores más bajos de la FAT (<10%).

En general, los tres tamaños de agregados presentaron mayores valores del IF<sub>i</sub> en el horizonte Ap, donde los contenidos de CO, en su promedio general, fueron superiores en cerca de 2 g kg<sup>-1</sup> y el FAT en aproximadamente 1.2% en relación con el horizonte A1 (Tabla 3-5). En la misma Tabla se observa como los promedios generales de los porcentajes de arcilla (FaT) en los horizontes Ap y A1 estuvieron muy cercanos.

**Figura 3-5:** Relación de las variables carbono orgánico (CO), fracción arena total (FAT) e índice de friabilidad en su límite inferior ( $IF_i$ ), utilizando el método spline.



**Tabla 3-5:** Promedios generales de los contenidos de FaT, FAT y CO de los horizontes Ap y A1.

Horizonte	IF <sub>i</sub> para los diferentes tamaños de agregados			FaT (%)	FAT (%)	CO (g kg <sup>-1</sup> )
	2 a 9.49 mm	9.50 a 19.00 mm	19.01 a 35.70 mm			
Ap	0.35	0.39	0.44	45.84	17.55	18.45
A1	0.30	0.35	0.39	45.53	16.35	16.72

A partir de esta evidencia, se considera que, probablemente, el bajo rango de variación del CO de los suelos estudiados (rango dominante sin valores extremos: 9 – 28 g Kg<sup>-1</sup>) no permitió observar mejor la tendencia de incremento del  $IF_i$  con el mayor contenido de CO. Correlaciones positivas entre estas dos variables fueron también reportadas por [Macks et al. \(1996\)](#) en Alfisoles y Oxisoles, cuyos contenidos de CO oscilaron entre 7 y 61 g kg<sup>-1</sup>, así mismo, [Watts y Dexter \(1998\)](#), en suelos con contenidos de CO entre 11 y 59 g kg<sup>-1</sup>, encontraron incrementos notables de la friabilidad con los mayores contenidos de MO. Sin embargo, en otros trabajos como el realizado por [Imhoff et al. \(2002\)](#) en oxisoles del trópico no se demostró correlación entre estas dos variables, lo cual fue atribuido al bajo rango de contenido de CO de los suelos (20 a 44 g kg<sup>-1</sup>); de igual forma, [Tormena et al. \(2008\)](#), tampoco encontraron efecto del CO en el  $IF_m$  en su trabajo experimental con cultivos en plantación directa y escarificación periódica en Oxisoles a 25 cm de profundidad.

En general, los suelos bajo estudio, de acuerdo con la clasificación propuesta por [Imhoff et al. \(2002\)](#) (Tabla 3-6), se clasificaron como friables a muy friables, con valores del  $IF_i$  que oscilaron entre 0.28 y 0.61. (Tabla 3-3).

**Tabla 3-6:** Clasificación de los suelos según el índice de friabilidad (IF) (Imhoff et al., 2002).

IF	Clasificación
< 0.1	No friable
0.1–0.2	Ligeramente friable
0.2-0.5	Friable
0.5-0.8	Muy friable
> 0.8	Mecánicamente inestable

### 3.6 Conclusiones

El dominio de minerales arcillosos tipo 1:1 (caolinitas) y 2:1 (esmeclitas y vermiculitas) no presentó efecto con nivel de significancia sobre el  $IF_i$  de los suelos estudiados; sin embargo, su análisis de manera descriptiva permitió concluir que en los tres tamaños de agregados estudiados la friabilidad de los suelos con dominio de arcillas 1:1 fue mayor que la presentada por los de dominio 2:1, lo que parece estar asociado a la menor capacidad de estabilización de la MO por parte de las caolinitas. Este aspecto le confiere a los suelos con dominio de caolinita menor resistencia y por lo tanto menor consumo de energía en las operaciones de labranza. Así mismo, la diferencia de los valores del  $IF_i$  entre los dos dominios fue mayor en los agregados más grandes (19.01 y 35.0 mm) y se hizo menor en los agregados de tamaño intermedio (9.50 y 19.0 mm).

En este trabajo no se encontró efecto con nivel de significancia de las fracciones arcilla y limo total sobre el  $IF_i$  de los suelos. Por el contrario, la fracción de arena total presentó diferencias altamente significativas, comprobándose que en estos suelos los mayores valores de arena total se correspondieron con los valores más bajos del  $IF_i$  (mayor resistencia del suelo). Esto permite concluir que la fracción gruesa de estos suelos ejerce una mayor influencia en el comportamiento de la friabilidad que la fracción más fina.

Si bien no se demostró una relación clara del  $IF_i$  con la clase textural, en la capa arable de los suelos estudiados se observó que las texturas FArL y ArL se asociaron con valores más bajos del  $IF_i$  en los agregados pequeños (mayor resistencia) y con valores más altos en los agregados de mayor tamaño (menor resistencia). Esto les confiere una mejor condición de friabilidad con relación a los suelos de textura FL, en los que tanto los agregados grandes como los pequeños presentaron valores altos del  $IF_i$ , situación que los hace muy susceptibles a la degradación estructural y les confiere baja condición de friabilidad. De otra parte, los suelos de texturas Ar y F no mostraron una asociación clara con el  $IF_i$  en la capa arable de los suelos.

Se comprobó la existencia de asociación entre el CO y el  $IF_i$ . Tanto en el horizonte Ap como en A1, los tres tamaños de agregados fueron más friables en la medida que los contenidos de CO fueron mayores; sin embargo, debido probablemente al bajo rango de variación del CO de los suelos estudiados (rango dominante sin valores extremos: 9 – 28 g kg<sup>-1</sup>), la asociación no se pudo observar más claramente. Así mismo, el horizonte Ap con mayores contenidos de CO en relación con el A1, presentó a su vez los mayores valores del  $IF_i$  en cada tamaño de agregado.

### 3.7 Agradecimientos

A la Universidad del Tolima, a COLCIENCIAS y a la Dirección de Investigaciones de la Universidad Nacional de Colombia por el apoyo económico; a los agricultores que permitieron en sus predios el muestreo de suelos; a CENICAÑA por el aporte de información y a los laboratorios de suelos de la Universidad Nacional de Colombia y el Instituto Geográfico Agustín Codazzi por la colaboración en la fase analítica de la investigación.

### 3.8 Referencias

American Society of Agronomy., 2002a. *Methods of Soil Analysis. Part 1: Physical and Mineralogical Methods*. Second Edition. Arnold Klute, Editor. Soil Science Society of America, Inc. Publisher Madison, Wisconsin USA, 1188 p.

American Society of Agronomy., 2002b. *Methods of Soil Analysis. Part 3: Chemical Methods*. Second Edition. Arnold Klute, Editor. Soil Science Society of America, Inc. Publisher Madison, Wisconsin USA, 1188 p.

Baldock, J.A., Skjemstad, J.O., 2000. Role of soil matrix and minerals in protecting natural organic materials against biological attack. *Org. Geochem.* 31, 697–710.

Barré, P., Fernández-Ugalde, O., Virto, I., Velde, B., Chenu, C., 2014. Impact of phyllosilicate mineralogy on organic carbon stabilization in soils: incomplete knowledge and exciting prospects. *Geoderma* 235-236, 382-395.

Barzegar, A.R., Murray, R.X., Churchman, G.J.; Rengasamy, P., 1994. The strength of remoulded soils as affected by exchangeable cations and dispersible clay. *Aust. J. of Soil Res.* 32, 185-199.

Barzegar, A.R., Oades, J.M., Rengasamy, P., Murray, R.S., 1995. Tensile strength of dry, remoulded soils as affected by properties of the clay fraction. *Geoderma* 65, 93-108.

Bruun, T.B., Elberling, B., Christensen, B.T., 2010. Lability of soil organic carbon in tropical soils with different clay minerals. *Soil Biol. Biochem.* 42, 888–895.

CENICAÑA., 2014. Mapa de localización de 18 fincas dedicadas al cultivo de caña de azúcar donde se realizó el estudio de friabilidad de los suelos. Sin publicar.

Christensen, B.T., 1992. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates. *Advances in Soil Sciences*, 20, 1–90.

Dexter, A. R., 1988a. Advances in characterization of soil structure. *Soil Till. Res.* 11, 199–238.

Dexter, A.R., and Kroesbergen, B., 1985. Methodology for determination of tensile strength of soil aggregates. *J Agri Eng Res.* 31, 139–147.

Dexter, A.R., Watts, C.W., 2001. Tensile strength and friability. In: Smith, K.A., Mullins, C.E. (Eds.), *Soil and Environmental Analysis: Physical Methods*. Segunda edición. Marcel Dekker Inc, New York, pp. 405–433.

Dexter, A.R., G. Richard, D. Arrouays, E.A. Czyz, C. Jolivet, and O. Duval., 2008. Complexed organic matter controls soil physical properties. *Geoderma* 144, 620–627. doi:10.1016/j.geoderma.2008.01.022.

Eggleston, G., Klich, M., Antoine, A., Beltz, S., Viator, R., 2014. Brown and green sugarcane leaves as potential biomass: How they deteriorate under dry and wet storage conditions. *Ind Crop and Prod.* 57, 69-81.

Esengun, K., Erdal, G., Gunduz, O., Erdal, H., 2007. An economic analysis and energy use in stake-tomato production in Tokat province of Turkey. *Renew Ener.* 32, 1873-1881.

Goldberg, S., Kapoor, B.S., Rhoades, J.D., 1990. Effect of aluminum and iron oxides and organic matter on flocculation and dispersion of arid zone soils. *Soil Sci.* 150, 588- 593.

Guérif, J., 1994. Effects of compaction on soil strength parameters. Elsevier Science. Chapter 9, 191-213.

Guimarães, R.M.L., Tormena, C.A., Alves, S.J., Fidalski, J., Blainski, E., 2009. Tensile strength, friability and organic carbon in an oxisol under a crop-livestock system. *Scientia Agricola*. (Piracicaba, Brasil.), Vol.66, No4, 499-505.

IGAC - Instituto Geográfico Agustín Codazzi., 2006. Estudio Detallado de Suelos y Capacidad de Uso de las Tierras Sembradas con Caña de Azúcar en el Valle Geográfico del Río Cauca. Bogotá.

IGAC - Instituto Geográfico Agustín Codazzi., 2006a. Métodos analíticos del laboratorio de suelos. Sexta edición. Bogotá, 674 p.

Imhoff, S., Da Silva, P.A., and Dexter, A.R., 2002. Factors contributing to the tensile strength and friability of Oxisols. *Soil Sci Soc Am J.* 66, 1656-1661.

Jindaluang, W., Kheoruenromne, I., Suddhiprakarn, A., Singh, B. P., Singh, B., 2013. Influence of soil texture and mineralogy on organic matter content and composition in physically separated fractions soils of Thailand. *Geoderma* 195-196, 207-219.

Kay, B. D., and Dexter, A. R., 1992. The influence of dispersible clay and wetting/drying cycles on the tensile strength of a red-brown earth. *Aus J Soi Res.* 30, 297-310.

Macks, S.P., Murphy, B.W., Cresswell, H.P., and Koen, T.B., 1996. Soil friability in relation to management history and suitability for direct drilling. *Aus J Soi Res.* 34, 343-360.

Munkholm, L. J., 2011. Soil friability: A review of the concept, assessment and effects of soil properties and management (Review). *Geoderma* 167-168, 236–246.

Munkholm, L.J., and Kay, B.D., 2002. Effect of Water Regime on Aggregate-tensile Strength, Rupture Energy, and Friability. *Soil Sci Soc Am J.* 66, 702-709.

Munkholm, L.J., Schjøning, P., Kay, B.D., 2002a. Tensile strength of soil cores in relations to aggregate strength, soil fragmentation and pore characteristics. *Soil Till. Res.* 64, 125–135.

Munkholm, L.J., Heck, R.J., Deen, B., 2012. Soil pore characteristics assessed from X-ray micro-CT derived images and correlations to soil friability. *Geoderma* 181-182, 22-29.

Oades, J.M., 1984. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. *Plant Soil.* 76, 319–337.

Rahimi, H., Pazira, E., Tajik, F., 2000. Effect of soil organic matter, electrical conductivity and sodium adsorption ratio on tensile strength of aggregates. *Soil Till. Res.* 54, 145-153.

Schjøning, P., Heckrath, G., Christensen, B.T., 2009. Threats to Soil Quality in Denmark. DJF Report Plant Science No. 143. Aarhus University. Denmark.

Schjøning, P., De Jonge, L.W., Munkholm, L.J., Moldrup, P., Christensen, B.T., Olesen, J.E., 2011. Clay dispersibility and soil friability-testing the soil clay-to-carbon saturation concept. *Soil Sci Soc Am J. Special section: Soil Architecture and Function. Vadose Zone J.* doi:10.2136/vzj2011.0067.

Sefeedpari, P., Shokoohi, Z., Behzadifar, Y., 2014. Energy use and carbon dioxide emission analysis in sugarcane farms: a survey on Haft-Tappeh Sugarcane Agro-Industrial Company in Iran. *Journal of Cleaner Production*, 83, 212-219.

Statistical Analysis System - SAS., 2009. SAS users guide; SAS/STAT – 9.3 (1) User’s guide the GLM procedure (Book excerpt), SAS Campus Drive, Cary North Carolina Rv. 27513, pp. 206.

Tormena, C.A., Araujo, M.A., Fidalsky, J., Imhoff, S., Da Silva, A.P., 2008. Quantification of tensile strength and friability of an Oxisol (Acrudox) under no-tillage. *Revista Brasileira de la Ciencia del Suelo.* Vol. 32, No 3, 1-11.

Turmel, M.S., Speratti, A., Baudrón, F., Verhulst, N., Govaerts, B., 2014. Crop residue management and soil health: A systems analysis. *Agr Syst.* doi: 10.1016/j.agsy.201405.009.

USDA., 2010. Keys to Soil Taxonomy, Eleventh Edition. By Soil Survey Staff. Natural Resources Conservation Service. Washington, D.C. USA, pp. 365.

Utomo, W.H., Dexter, A.R., 1981. Soil friability. *J. Soil Sci.* 32, 203–213.

Watts, C.W., and Dexter, A.R., 1998. Soil friability: theory, measurement and the effects of management and organic carbon content. *Eur J. Soil Sci.* 49, 73–84.

# **Capítulo 4. Relación de la friabilidad con diferentes propiedades físicas y químicas en los suelos bajo cultivo de caña de azúcar en sectores del Valle Geográfico del Río Cauca, Colombia**

**Relationship between friability and different physical and chemical properties in soils cultivated with sugar cane in the Valle Geográfico del Río Cauca region of Colombia**

## **4.1 Resumen**

La friabilidad es un indicador importante de la calidad física de los suelos, estrechamente relacionada con la microestructura del suelo. Además de la textura, la mineralogía y el contenido de materia orgánica, la friabilidad en el medio edáfico depende de otras propiedades físicas y químicas que influyen en su variabilidad. En este sentido, se planteó como objetivo de esta investigación evaluar la relación de la friabilidad con diferentes propiedades físicas y químicas de suelos cultivados en caña de azúcar (plantaciones dedicadas al cultivo durante más de 20 años). El muestreo de suelos se realizó en los dos primeros horizontes (Ap y A1) de 91 sitios (5 tipos de suelos: Inceptisol, Molisol, Vertisol, Alfisol y Ultisol), localizados en el centro y sur del departamento del Valle del Cauca y norte del departamento del Cauca (Colombia). Se seleccionaron 10 agregados por cada uno de los cuatro rangos de tamaño que fueron los predominantes en los 182 horizontes; estos agregados fueron secados en dos ambientes: invernadero y horno a baja temperatura, luego de lo cual fueron sometidos a la prueba de compresión para determinar la resistencia al rompimiento (RR) y a partir de ella, se estableció el índice de friabilidad correspondiente al límite inferior ( $IF_i$ ) del intervalo de confianza del coeficiente de variación. Se determinó el diámetro ponderado medio (DPM), el estado de agregación (Ea), la densidad aparente (Da), la porosidad total (Pt), el pH y la conductividad eléctrica (CE); adicionalmente se elaboraron secciones delgadas y se realizó microscopía electrónica de barrido (SEM) para algunas muestras de suelo. El análisis estadístico incluyó medidas de tendencia central y dispersión, gráficos de superficies tridimensionales y un modelo lineal para un diseño completamente al azar en arreglo factorial incompleto. No se encontró efecto del DPM, la Da, el pH y la CE sobre el  $IF_i$ ; por el contrario, el Ea y la Pt presentaron efecto significativo desde el punto de vista inferencial. Así mismo, el  $IF_i$  presentó valores más altos en aquellos suelos en los que se encontró desarrollo de microestructura (bloques subangulares), determinada a partir de secciones delgadas, comparativamente con otros en los que no hubo desarrollo de microestructura (masiva),

evidenciando la relación positiva entre desarrollo de microestructura y el  $FI_i$  en los suelos estudiados.

**Palabras clave:** índice de friabilidad, estabilidad de agregados, densidad aparente, porosidad total, pH.

## 4.2 Abstract

Friability is an important indicator of the physical quality of soils, closely related to the microstructure of the soils. Besides texture, mineralogy and organic material content, soil friability depends on other physical and chemical properties that influence its variability. Therefore, this study aimed to evaluate the relationship between friability and differed physical and chemical properties of soils cultivated with sugar cane (on farms with more than 20 years dedicated to this crop). The soil sampling was carried out in the first two horizons (Ap and A1) at 91 sites (5 soil types: Inceptisol, Molisol, Vertisol, Alfisol and Ultisol) located in the central and southern regions of the Valle del Cauca Department and the northern region of the Cauca Department (Colombia). Ten aggregates were selected for each of the four size ranges that predominated in the 182 horizons. These aggregates were dried in two environments: a greenhouse and a low-temperature oven. Afterwards, they were subjected to a compression test in order to determine the tensile strength (TS), which was used to establish the friability index that corresponded to the lower limit ( $FI_i$ ) of the confidence interval of the coefficient of variance. The mean weight diameter (WMD), the aggregation state (Sa), the bulk density (Da), total porosity (Pt), pH and the electric conductivity (EC) were determined. In addition, thin sections were created and a scanning electron microscope (SEM) was used on some of the soil samples. The statistical analysis included measures of central tendency and dispersion, tridimensional superficial graphs, and a lineal model for a completely random incomplete factorial design. No effect was found from the WMD, Da, pH, or EC on the  $FI_i$ . However, the Sa and Pt presented significant effects from the inferential point of view. Likewise, the  $FI_i$  presented higher values in the soils that had microstructural development (subangular blocky), as determined with the thin sections and as compared with the soils that did not have microstructural development (massive), indicating the positive relationship between microstructural development and the  $FI_i$  in the studied soils.

**Keywords:** friability index, aggregate stability, apparent density, total porosity, pH.

## 4.3 Introducción

La friabilidad entendida como la tendencia de una masa de suelo no confinada a romperse y desmoronarse bajo un esfuerzo aplicado en un rango particular de tamaño de agregados más pequeños (Utomo y Dexter, 1981; Munkholm, 2011), es una propiedad que no solo es importante en los suelos sometidos a labranza convencional, sino que también es de crucial importancia en el establecimiento de cultivos bajo siembra directa (Macks et al., 1996). La friabilidad del suelo es un factor importante en la determinación de su posible respuesta a la labranza. Un suelo friable requiere un mínimo de labranza para producir una adecuada cama de siembra con pequeños agregados estables que proporcionan condiciones óptimas para el

crecimiento de la planta, por el contrario, un suelo no friable puede demandar alta energía en las operaciones de labranza que generan impactos negativos en el ambiente (Esengun et al., 2007; Sefeepari et al., 2014), y finalmente producir una pobre cama de siembra con agregados muy finos que pueden conducir a sellamiento y encostramiento superficial en presencia de lluvia o riego, o terrones grandes que proporcionan condiciones inadecuadas para la germinación, emergencia y establecimiento de las plantas (Mullins et al., 1990; Macks et al., 1996).

La friabilidad es una propiedad física cuyo comportamiento se ve influenciado por diferentes propiedades o características del suelo, entre ellas: la estabilidad de los agregados y la densidad aparente (Macks et al., 1990; Watts y Dexter, 1998), la porosidad (Munkholm et al., 2002a; Munkholm et al., 2012), la microestructura (Dexter y Watts, 2001), la materia orgánica (Macks et al., 1996; Watts y Dexter, 1998; Munkholm 2011, Schjønning et al., 2011), el tipo y cantidad de la fracción arcilla (Barzegar et al., 1995 y Macks et al., 1996) y la concentración y composición de la solución del suelo (Rahimi et al., 2000).

La friabilidad es considerada un indicador de la condición estructural del suelo (Watts y Dexter, 1998); de acuerdo con estos mismos autores, el origen de la friabilidad del suelo puede entenderse considerando la naturaleza de un suelo bien estructurado. Dexter (1988a), considera una jerarquía en la conformación de la estructura del suelo, que se inicia con la formación de dominios estables de partículas de arcillas floculadas que se agrupan en microagregados, y estos, a su vez, se organizan en agregados que unidos entre sí forman terrones o macroagregados; cada conjunto, sucesivamente más grande, es más débil por la presencia de microgrietas o pequeñas fallas. En este sentido, un suelo friable se caracteriza por la baja resistencia y fácil fragmentación de los agregados o terrones grandes y la mayor resistencia y dificultad en la fragmentación de los agregados de menor tamaño (Macks et al., 1996). Para Dexter (1997), la resistencia no debe ser demasiado grande porque se afecta la penetración de raíces y organismos del suelo; este mismo autor sostiene que la resistencia y la estabilidad son necesarias para preservar la estructura del suelo frente a las presiones impuestas (gotas de lluvia y mecanización, entre otras). El término estabilidad se utiliza para describir la capacidad que tiene el suelo de mantener una estructura coherente en presencia de agua libre; sin embargo, se conocen pocos trabajos en los que se relacione el efecto de la estabilidad estructural del suelo, medida a partir del DPM y el Ea, con el índice de friabilidad de los suelos.

La estabilidad y friabilidad del suelo están relacionadas con la fractura por fragilidad del suelo (Braunack et al., 1979; Dexter y Watts, 2001). La friabilidad depende en gran medida de la facilidad de fractura del suelo y el desarrollo progresivo de planos de fractura que originan grietas, y con estas, la pérdida de resistencia del mismo (Munkholm et al., 2012). La propagación de las grietas en un suelo no confinado sometido a presión depende de la abundancia y morfología (orientación y conectividad) de los poros y de la resistencia de los extremos de las fisuras o microgrietas (Hallett et al., 1995 a y b). Un fuerte vínculo entre la friabilidad y fragmentación del suelo con el espacio poroso ocupado por aire fue reportado por Munkholm et al. (2002a); en un trabajo posterior, Munkholm et al. (2012) confirmaron la correlación significativa entre la porosidad y la friabilidad en suelos en Canadá mediante la observación de la estructura del suelo en imágenes tridimensionales. Para Alaoui et al. (2011), la alta proporción de microporos, junto con un alto número de puntos de contacto entre las partículas del suelo, conduce a una mayor resistencia interna a la ruptura en los agregados. De acuerdo con Guérif et al. (2001), se pueden considerar dos tipos de porosidad en el suelo: la porosidad textural y la porosidad estructural. La porosidad textural se origina entre las

partículas minerales primarias, mientras que la porosidad estructural comprende las microfisuras, grietas y bioporos localizados entre las formas estructurales del suelo. La porosidad estructural de acuerdo con [Alaoui et al. \(2011\)](#), se corresponde con el espacio poroso localizado entre los agregados y microagregados, los bioporos y las grietas de desecación. En este sentido, [Dexter \(2004a\)](#), considera que la porosidad textural resulta poco afectada por el manejo de los suelos mientras que la porosidad estructural es sensible a factores de manejo tales como la labranza, la compactación y el cultivo.

En las tierras de cultivo, el uso de maquinaria agrícola en las actividades de labranza es una de las causas más comúnmente asociadas a la reducción de la porosidad y el incremento de la densidad aparente ([Etana et al., 2013](#); [Kuncoro et al., 2014](#)). De acuerdo con [Munkholm et al. \(2002a y b\)](#), en general, la friabilidad del suelo disminuye con el aumento de la densidad aparente y se incrementa la RR ([Guerif, 1990](#)). Así mismo, [Macks et al. \(1996\)](#), encontraron que los suelos con baja friabilidad tienden a presentar alta densidad aparente, requiriendo un esfuerzo mayor en la labranza para producir una adecuada cama de siembra; de acuerdo con estos autores, suelos con estas características son considerados inadecuados para la siembra directa. Algunos autores han encontrado también relación entre la friabilidad y algunas propiedades químicas de los suelos, en este sentido, [Barzegar et al. \(1994, 1995\)](#), [Rahimi et al. \(2000\)](#) y [Munkholm \(2011\)](#), sugieren que la RR y por lo tanto la friabilidad dependen de la cantidad de cationes, arcilla dispersable, tipo y tamaño de arcilla, contenido de materia orgánica y la concentración y composición de la solución del suelo.

El objetivo de la presente investigación fue evaluar la relación de la friabilidad con diferentes propiedades físicas y químicas de los suelos bajo cultivo de caña de azúcar en algunos sectores del Valle Geográfico del Río Cauca (Colombia).

## 4.4 Materiales y métodos

### 4.4.1 Sitios de muestreo

La presente investigación se llevó a cabo en fincas dedicadas al cultivo de caña de azúcar con prácticas similares de manejo mecanizado de los suelos, localizadas en el centro y sur del departamento del Valle del Cauca y norte del departamento del Cauca, Colombia (Tabla 4-1). Los predios hacen parte del bosque seco tropical (clasificación de zonas de vida de Holdridge) y de la unidad climática correspondiente al Tropical Lluvioso de Sabana (Awi) (clasificación climática de Köppen). Los suelos estudiados pertenecen a los órdenes Inceptisol, Vertisol, Molisol, Alfisol y Ultisol ([USDA, 2010](#)) y se localizan en los planos de terraza de la llanura aluvial del Río Cauca. Las principales propiedades y características físicas y químicas de estos suelos se encuentran en la Tabla 4-1 y Anexo H.

A partir del estudio detallado de suelos de la zona donde se localizaron los predios ([IGAC, 2006](#)), en cada uno de ellos se localizó un perfil modal de suelo y dentro de los límites del mismo se ubicaron 5 sitios de observación distantes entre sí aproximadamente 100 m. En cada sitio de observación se realizó la delimitación y muestreo de los dos primeros horizontes (Ap y A1), en cajuelas de aproximadamente 50 x 50 cm de lado y 50 cm de profundidad.

**Tabla 4-1:** Localización geográfica de las fincas donde se realizó el muestreo y principales propiedades físicas y químicas de los suelos.

Finca No	Coordenadas sitio de muestreo central	Taxonomía de los suelos	Número de sitios de muestreo	DPM (mm) pond. (Ap/A1)	Ea (%) pond. (Ap/A1)	Da (Mg m <sup>-3</sup> ) pond. (Ap/A1)	Pt pond. (%) (Ap/A1)	pH pond. (Ap/A1)	CE (mS/cm) pond. (Ap/A1)
1	3°17'32.9"/ 76°30'39.2"	Udertic	6	2.9	81.7	1.2	52.7	5.6	0.4
		Haplustalfs		3.0	82.9	1.3	49.3	5.7	0.3
2	3°16'03.4"/ 76°30'20.2"	Vertic	5	3.3	78.3	1.3	49.5	5.4	1.1
		Endoaqualfs		3.0	76.4	1.3	49.9	5.9	0.5
3	3°37'31.6"/ 76°19'50.2"	Vertic	5	1.3	46.2	1.4	44.9	7.8	1.1
		Haplustolls		1.3	45.8	1.4	45.3	7.8	1.2
4	3°46'52.1"/ 76°22'20.1"	Typic	5	1.5	57.2	1.3	44.2	8.1	1.6
		Calciusterts		1.2	52.1	1.3	46.9	8.4	1.3
5	3°7'42.5"/ 76°24'42.2"	Typic	5	3.0	80.3	1.4	43.8	4.8	0.3
		Palehumults		2.5	75.5	1.4	42.2	4.7	0.3
6	3°5'30.4"/ 76°28'03.2"	Typic	5	3.2	83.1	1.4	42.0	4.9	0.4
		Palehumults		3.1	79.9	1.4	42.8	5.3	0.4
7	3°4'4.5"/ 76°25'54.9"	Vertic	5	3.1	76.8	1.4	42.0	5.8	0.6
		Haplustalfs		3.8	86.0	1.5	41.5	5.9	0.8
8	3°13'6.2"/ 76°30'23.1"	Udertic	5	4.2	92.0	1.5	40.8	5.1	0.3
		Haplustalfs		4.6	91.0	1.5	40.4	5.1	0.6
9	3°38'11.5"/ 76°18'23.4"	Typic	5	1.3	41.6	1.3	47.4	7.9	1.8
		Haplustolls		1.4	47.6	1.4	44.5	7.4	1.6
10	3°40'12"/ 76°24'31"	Typic	5	0.5	18.7	1.3	51.2	8.1	2.6
		Haplustepts		0.4	12.9	1.5	46.3	8.2	1.5
11	3°47'45.2"/ 76°17'19.6"	Vertic	5	2.6	76.4	1.3	49.1	6.8	0.9
		Haplustolls		2.2	71.7	1.3	46.1	6.7	0.7
12	3°42'24.7"/ 76°23'8"	Petrocalcic	5	2.2	67.1	1.5	38.7	7.0	1.3
		Haplusterts		1.8	60.4	1.5	39.2	7.4	1.0
13	3°55'35.8"/ 76°18'26.8"	Entic	5	1.6	70.5	1.2	49.6	5.9	0.8
		Haplusterts		1.3	67.0	1.2	47.4	6.3	0.6
14	3°42'6.11"/ 76°17'49.1"	Entic	5	2.7	70.1	1.6	39.2	6.3	0.7
		Haplustolls		1.9	61.9	1.5	41.3	6.5	0.6
15	4°4'38.3"/ 76°14'12.5"	Entic	5	0.6	28.6	1.5	42.0	5.7	0.5
		Haplusterts		0.6	30.8	1.5	40.6	5.8	0.9
16	4°4'59"/ 76°17'16"	Typic	5	0.6	32.6	1.3	47.8	6.6	0.9
		Endoaquerts		0.6	31.2	1.3	45.7	6.6	0.9
17	3°31'37.8"/ 76°28'21.7"	Entic	5	0.5	18.7	1.2	54.4	5.9	1.8
		Haplustolls		0.5	18.6	1.3	51.1	6.0	1.8
18	3°3'1"/ 76°30'43.2"	Typic	5	1.7	57.0	1.3	49.3	5.2	0.4
		Palehumults		1.8	58.0	1.3	47.1	5.0	0.3

DPM: diámetro ponderado medio; Ea: estado de agregación; Da: densidad aparente; Pt: porosidad tota; pH: reacción; CE: conductividad eléctrica. Pond.: valor ponderado de la propiedad. Sitios mues.: sitio de muestreo de suelos.

#### 4.4.2 Toma y preparación de muestras

En los sitios de muestreo se tomó de cada horizonte (Ap y A1) un bloque de aproximadamente 30 cm de largo x 18 cm de ancho y 12 cm de espesor, de tal forma que en total se colectaron 182 bloques. Para evitar el deterioro o alteración de los bloques, estos se envolvieron en plástico adherente y posteriormente se transportaron en cajas de madera hasta el laboratorio donde se separaron manualmente los agregados de cada bloque aprovechando los planos de debilidad natural del suelo. Estos agregados se pasaron

a través de un conjunto de tamices dispuestos en secuencia vertical desde el tamaño de malla de 50 mm (tamiz superior) hasta el tamaño de malla de 1 mm (tamiz inferior), lo que permitió seleccionar 4 rangos de tamaño de agregados dominantes: 2.0 a 4.79 mm, 4.80 a 9.49 mm, 9.50 a 19.00 mm y 19.01 a 35.70 mm. De cada rango de tamaño se tomaron aleatoriamente 10 agregados por muestra para un total de 7280 agregados que fueron secados durante 5 días en invernadero a una temperatura promedio diaria de 29°C. Posteriormente se llevaron al horno a una temperatura constante de 40°C durante 48 horas (Guimarães et al., 2009). Con el propósito de evitar que las muestras ganaran humedad del ambiente luego del secado al horno, los agregados se embolsaron y se depositaron en un recipiente de cierre hermético hasta el momento en que se sometieron a pesaje y posterior ensayo de compresión. En el anexo I (parte 1) se puede observar en detalle el diseño del experimento.

De los agregados inicialmente separados de cada bloque de suelo se obtuvo también las muestras para las determinaciones del DPM y el  $E_a$  (tamices de tamaño de malla 6.3, 4.0, 2.0, 1.0 y 0.425 mm). Para la determinación de la  $D_e$ , en cada horizonte se recolectaron por duplicado muestras en cilindros de 50 mm de altura y 49 mm de diámetro. Así mismo, para las determinaciones de pH y CE se tomó aproximadamente 500g de muestra por horizonte.

#### 4.4.3 Determinación de la resistencia al rompimiento e índice de friabilidad

La RR se determinó a partir de la prueba de compresión propuesta por Dexter y Watts (2001), usando una prensa mecánica CBR (Soiltext - CF410) de dos velocidades. En la prueba, los 7.280 agregados, previamente pesados, se colocaron individualmente entre los dos platos paralelos del equipo y se les aplicó carga con una velocidad de deformación constante de  $0.07 \text{ mm s}^{-1}$ , hasta que se produjo el rompimiento de los agregados.

El cálculo de la RR de los agregados de cada horizonte se estableció usando la ecuación propuesta por Utomo y Dexter (1981); Dexter y Kroesbergen (1985):

$$RR = 0.576 (P/D_e^2) \quad (4.1)$$

donde, RR (generalmente expresada en kPa) es la resistencia al rompimiento, P (N) el valor del pico de fuerza registrado al momento de la ruptura de cada agregado,  $D_e$  (m) el diámetro efectivo del conjunto de agregados de cada horizonte y el valor 0.576 corresponde a una constante de proporcionalidad.

El diámetro efectivo ( $D_e$ ) (m) se calculó de acuerdo con las masas individuales de los agregados a partir de la ecuación (Dexter y Watts, 2001):

$$D_e = D_m (M/M_0)^{1/3} \quad (4.2)$$

donde  $D_m$  (m) es el diámetro medio de los agregados de cada horizonte, M (g) es la masa de cada agregado y  $M_0$  (g) la masa media del conjunto de agregados de cada horizonte. El diámetro medio de los agregados ( $D_m$ ) se obtuvo a partir de la ecuación propuesta por Dexter y Kroesbergen (1985):

$$D_m = (d_1 + d_2) / 2 \quad (4.3)$$

donde  $d_1$  es el tamaño de abertura de malla del tamiz superior (m) y  $d_2$ , el tamaño de abertura de malla del tamiz inferior (m).

El índice de friabilidad (IF) del conjunto de agregados de cada horizonte se halló mediante el coeficiente de variación (en su límite inferior) propuesto por [Dexter y Watts \(2001\)](#):

$$IF = \frac{\sigma_y}{\bar{Y}} \pm \frac{\sigma_y}{\bar{Y}\sqrt{2n}} \quad (4.4)$$

en el que se relaciona la desviación estándar de los valores medidos de resistencia a la compresión ( $\sigma_y$ ), y las medias de la resistencia a la compresión ( $\bar{Y}$ ) medidas en  $n$  réplicas; en este estudio en valor de  $n$  fue de 10 (agregados) por cada horizonte de suelo.

#### 4.4.4 Determinaciones físicas y químicas de los suelos

La Da se obtuvo mediante la recolección en cada horizonte de una muestra de suelo en un cilindro de volumen conocido ([IGAC, 2006a](#); [Soil Science Society of America, 2002](#); [American Society of Agronomy, 2002a](#)). El DPM y Ea se determinaron mediante la técnica de tamizado en húmedo propuesto por [Yoder \(1936\)](#), utilizando para ello el movimiento continuo de 100 g de suelo (agregados entre 6.3 y 8 mm) en agua, a partir de un conjunto de tamices de tamaño de malla 6.3, 4.0, 2.0, 1.0 y 0.425 mm dispuestos en orden descendente respectivamente ([IGAC, 2006a](#); [American Society of Agronomy, 2002a](#)); estas dos características se hallaron mediante las relaciones:

$$DPM = \sum_{i=1}^n M_{ssi} \bar{X}_i / 100 \quad (4.5)$$

donde, DPM es el diámetro ponderado medio (mm),  $M_{ssi}$  es el porcentaje (en relación con la masa total: 100 g) de los agregados del suelo retenidos en cada tamiz y  $\bar{X}_i$  es el promedio del diámetro de malla entre el tamiz superior y el subsiguiente (mm). El estado de agregación a partir de:

$$Ea = 100 - \sum M_{ssi} \quad (4.6)$$

en la que  $M_{ssi}$  es el porcentaje (en relación con la masa total: 100 g) de los agregados del suelo retenidos en cada tamiz (6.3, 4, 2, 1, 0.425 mm). El Ea se interpreta utilizando la tabla 10-E del Anexo E.

La porosidad total se estimó a partir de la relación entre las densidades real (determinada por el método del picnómetro) y la densidad aparente (determinada por el método del cilindro) ([IGAC, 2006a](#); [Soil Science Society of America, 2002](#); [American Society of Agronomy, 2002a](#)). Las variables químicas pH y CE se determinaron, la primera, a través del método electrométrico en relación suelo-agua 1:1 (p/v) y la segunda, mediante la técnica del extracto de saturación ([American Society of Agronomy, 2002b](#); [IGAC, 2006a](#)).

#### 4.4.5 Preparación de secciones delgadas y Microscopía electrónica de barrido (SEM)

El montaje de las láminas delgadas se realizó para algunos horizontes Ap, a partir de la obtención de bloques de suelo indisturbado de aproximadamente 10 cm de largo x 8 cm de ancho y 4 cm de espesor, que se llevaron a secado al horno entre 24 y 48 horas a una temperatura de 50°C. Una vez secos y dentro de un recipiente plástico, se les adicionó mezcla aglutinante (resina, endurecedor y diluyente, en proporción 5-1-0.5) de manera progresiva hasta cubrir completamente cada bloque de suelo, aplicando vacío para lograr una mejor impregnación. Luego de dejar endurecer la mezcla y suelo a una temperatura de 50°C por cerca de 24 horas, se tomó cada bloque y se le realizó un doble corte hasta lograr un pequeño bloque de tamaño similar al portaobjetos de vidrio (27 x 45 mm), al cual se adhirió con mezcla de resina y endurecedor una vez pulida una de sus caras. Posteriormente, se procedió a un último corte hasta dejar el pequeño bloque a un espesor de aproximadamente 80 micras y finalmente al desbaste final que lo llevó a un espesor de aproximadamente 30 micras (IGAC, 2006a; American Society of Agronomy, 2002a).

Adicionalmente, algunas muestras representativas de los suelos con dominio arcilloso tipo 1:1 y 2:1 (de los horizontes Ap y A1) fueron previamente secadas en el invernadero a temperatura promedio de 29°C y sus agregados disgregados con rodillo de madera. De estas muestras se obtuvo, mediante tamizado, material de suelo de la fracción menor de 0.425 mm tratado inicialmente con metalización y posteriormente sometido a la técnica de microscopía electrónica de barrido (SEM por sus siglas en inglés), en un equipo marca FEI, Quanta 200.

#### 4.4.6 Análisis estadístico

El análisis estadístico involucró los componentes descriptivo e inferencial (Anexo E). Desde el punto de vista descriptivo se determinaron medidas de tendencia central y dispersión (SPSS, versión 22) (IBM, 2013); así mismo, se construyeron gráficos de superficies tridimensionales del  $IF_i$  asociado con las variables  $E_a$ , DPM,  $D_a$ , Pt, CE y pH para cada horizonte morfogénico. Adicionalmente se realizó una tabla cruzada con las medias del  $IF_i$  estimadas por mínimos cuadrados de modo multivariante (por horizonte y clase taxonómica de suelo) y una tabla de promedios del  $IF_i$ , DPM, pH y CE segregados por clases de estabilidad de los suelos y horizonte morfogénico. Desde el punto de vista inferencial se ajustó un modelo lineal para un diseño factorial incompleto en arreglo completamente al azar, para el cual se realizó un análisis de covarianza multivariante (Statistical Analysis System, v. 9.3), una vez revisados los supuestos necesarios. Se utilizó como matriz de respuestas el  $IF_i$  en cada tamaño de agregado (columnas de la matriz en la Tabla 4-2), como factores de clasificación el horizonte y la clase taxonómica y como covariables el Pt y el  $E_a$ . Las covariables  $D_a$  y DPM no cumplieron los supuestos necesarios para permanecer en el modelo estadístico planteado.

## 4.5 Resultados y discusión

El análisis de covarianza que se presenta en la Tabla 4-2, permite observar que no se presentó interacción entre los factores de clasificación asociados al tipo de horizonte y la taxonomía de los suelos a nivel de orden ( $p=0.5888$ ), con lo cual se hicieron interpretables los efectos principales asociados a estos factores.

**Tabla 4-2:** Análisis de covarianza multivariante para los efectos considerados en el modelo usando el estadístico Lambda de Wilks para el cálculo del valor F.

Fuente de variación	Matriz de suma de cuadrados	F calculado	P valor
Horizonte	$\begin{bmatrix} 0.145 & 0.064 & 0.104 \\ 0.064 & 0.046 & 0.074 \\ 0.104 & 0.074 & 0.120 \end{bmatrix}$	6.29	0.0005
Taxonomía (orden de suelo)	$\begin{bmatrix} 0.145 & 0.074 & 0.110 \\ 0.074 & 0.082 & 0.105 \\ 0.110 & 0.105 & 0.292 \end{bmatrix}$	3.48	< 0.0001
Horizonte*Taxonomía	$\begin{bmatrix} 0.014 & 0.014 & 0.032 \\ 0.014 & 0.028 & 0.027 \\ 0.032 & 0.027 & 0.108 \end{bmatrix}$	0.86	0.5888
Porosidad total	$\begin{bmatrix} 0.004 & 0.019 & 0.020 \\ 0.019 & 0.096 & 0.100 \\ 0.020 & 0.100 & 0.104 \end{bmatrix}$	4.61	0.0040
Estado de agregación	$\begin{bmatrix} 0.028 & 0.054 & 0.040 \\ 0.054 & 0.106 & 0.078 \\ 0.040 & 0.078 & 0.058 \end{bmatrix}$	4.33	0.0057
Error	$\begin{bmatrix} 1.156 & 0.342 & 0.337 \\ 0.342 & 1.937 & 0.282 \\ 0.337 & 0.282 & 2.422 \end{bmatrix}$		
Total	$\begin{bmatrix} 0.280 & 0.225 & 0.306 \\ 0.225 & 0.358 & 0.384 \\ 0.306 & 0.384 & 0.682 \end{bmatrix}$		

La significancia asociada a los horizontes fue de  $p=0.0005$ , con lo que se confirmó que los promedios de las matrices de los  $IF_i$  entre los horizontes superficiales fueron diferentes; esto se observa en la Tabla 4-3, donde es claro el mayor valor del  $IF_i$  del horizonte Ap en los tres rangos de tamaño de agregados de los 5 órdenes de suelos considerados. Lo anterior pone de manifiesto la importancia de considerar la separación de los horizontes superficiales por sus límites naturales al momento de realizar el muestreo para determinar el IF de los suelos.

**Tabla 4-3:** Medias del Índice de Friabilidad ( $IF_i$ ) estimadas por mínimos cuadrados por horizonte y taxonomía de orden en los diferentes tamaños de agregados.

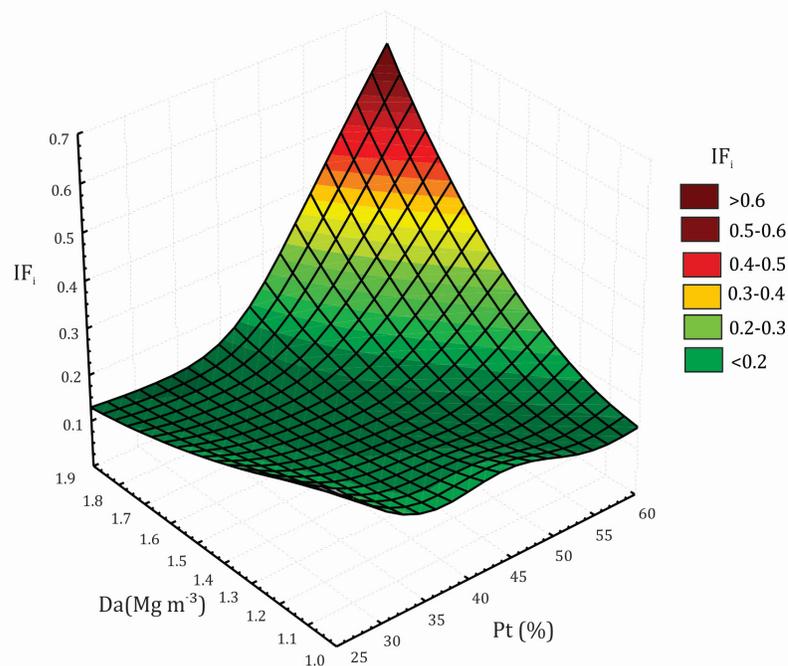
Horizonte	Tamaño agregados	Clase taxonómica				
		Alfisol	Inceptisol	Molisol	Ultisol	Vertisol
Ap	2.0-9.49 mm	0.35	0.46	0.36	0.36	0.31
	9.50-19.00 mm	0.38	0.49	0.38	0.37	0.39
	19.01-35.70 mm	0.51	0.61	0.42	0.37	0.40
	Promedio	0.41	0.52	0.39	0.37	0.37
A1	2.0-9.49 mm	0.28	0.40	0.32	0.30	0.28
	9.50-19.00 mm	0.32	0.44	0.38	0.31	0.36
	19.01-35.70 mm	0.39	0.46	0.39	0.35	0.39
	Promedio	0.33	0.43	0.36	0.32	0.34

De igual forma, la significancia asociada a la taxonomía de los suelos a nivel de orden fue  $p < 1\%$  (Tabla 4-2), lo que confirmó la diferencia de los promedios de las matrices del índice de friabilidad entre los diferentes órdenes taxonómicos de suelos considerados.

Si se observa en la Tabla 4-3 el valor del  $IF_i$  del horizonte Ap de los suelos (horizonte más afectado por la labranza), se percibe como los Alfisoles presentaron la mejor condición de friabilidad, ya que los agregados pequeños (2.0 a 9.49 mm) de estos suelos exhibieron valores bajos de  $IF_i$  (mayor resistencia al rompimiento) y los agregados más grandes (19.0 a 35.7 mm) registraron los valores más altos; en otras palabras, los agregados pequeños ofrecerán mayor resistencia al rompimiento, mientras que los más grandes, por su menor resistencia, fragmentarán más fácilmente. Resultados similares de incremento de la RR con la disminución del tamaño de los agregados fue reportado por [Blanco-Moure et al. \(2012\)](#), [Blanco-Canqui et al. \(2005\)](#), y [Perfect y Kay \(1994\)](#), lo que fue explicado por la menor cantidad de puntos de debilidad (microfisuras y poros) y enlaces más fuertes entre las partículas en los agregados de menor tamaño. De acuerdo con [Imhoff et al. \(2002\)](#), valores mayores del IF indican que los agregados grandes o terrones tienen una menor resistencia que los agregados pequeños y pueden ser más fácilmente fragmentados en unidades pequeñas más resistentes, produciendo una adecuada distribución de tamaño de agregados con menores requerimientos de labranza. De igual forma, [Macks et al. \(1996\)](#) sostienen que una condición friable del suelo implica que este requiere un mínimo de labranza para producir una buena cama de siembra con pequeños agregados que proporcionen condiciones óptimas para la germinación y establecimiento de plantas. Con relación a los tipos de suelos estudiados, los Vertisoles presentaron un comportamiento parecido al de los Alfisoles excepto que la diferencia entre el  $IF_i$  de los agregados pequeños y grandes es menor en los primeros, lo que sugiere comparativamente una menor friabilidad. Por el contrario, los Ultisoles presentaron un valor muy próximo del  $IF_i$  tanto en los agregados pequeños como en los grandes (0.36 y 0.37 respectivamente), lo que los hace suelos con una condición de friabilidad más limitada ya que los agregados grandes, por su bajo valor de  $IF_i$ , ofrecen mayor resistencia al rompimiento, de tal forma que su fragmentación en agregados más pequeños durante la labranza, se hace más compleja, requiriendo un mayor número de pases en la labranza en relación con los Alfisoles. En este sentido, [Rahimi et al. \(2000\)](#), afirman que los suelos que poseen agregados con mayor RR son más resistentes a la dispersión mecánica cuando se somete el suelo a preparación. Otro de los órdenes estudiados, los Molisoles, considerados suelos de alta vocación agrícola, presentan en este estudio valores intermedios de friabilidad tanto en Ap como en A1 con respecto a los demás órdenes trabajados.

Propiedades físicas como la Da y la porosidad han sido relacionadas con la friabilidad. Autores como [Watts y Dexter \(1998\)](#) y [Munkholm et al. \(2002 a, b\)](#), han reportado una relación inversa entre friabilidad y Da; así mismo, [Guérif \(1990\)](#), demostró que la RR se incrementó en los suelos con mayores valores de Da; sin embargo, en este trabajo no se encontró efecto significativo de esta variable física en el  $IF_i$ , posiblemente debido al bajo rango de variación de esta propiedad en los suelos estudiados ( $1.2-1.6 \text{ Mg m}^{-3}$ ). La Pt, en cambio, presentó un efecto altamente significativo ( $p < 1\%$ ) en el índice de friabilidad (Tabla 4-2). Se encontró que en general hay un incremento de la friabilidad del suelo a mayor Pt, en especial, cuando esta presenta valores superiores al 45% (Figura 4-1). Estos resultados coinciden con lo reportado por [Munkholm et al. \(2001\)](#) y [Munkholm et al. \(2012\)](#), quienes encontraron correlación positiva y significativa entre la Pt y la friabilidad de suelos franco limosos y franco arenosos. Es de resaltar que cuando los suelos tienen valores superiores al 45% de Pt, prevalece el efecto de esta propiedad sobre los valores altos de Da y se corresponde con los mayores valores de  $IF_i$ ; sin embargo, a valores de Pt que están aproximadamente por debajo del 30% y de Da inferiores a  $1.3 \text{ Mg m}^{-3}$ , prevalece la influencia de la densidad y se presenta un incremento del valor del  $IF_i$  de los suelos. En los suelos con Pt superior al 35% y baja Da (aproximadamente  $< 1.3 \text{ Mg m}^{-3}$ ), los valores del  $IF_i$  se mantienen aproximadamente constantes. En general, los valores más altos del  $IF_i$  se corresponden con los valores superiores al 45% de la Pt (Figura 4-1).

**Figura 4-1:** Relación de las variables densidad aparente (Da), porosidad total (Pt) e índice de friabilidad en su límite inferior ( $IF_i$ ), por el método spline.



Para [Dexter y Watts \(2001\)](#) el grado de desarrollo estructural y la estabilidad de los agregados afectan la friabilidad. En el presente estudio se evaluó el efecto de la estabilidad de la estructura, específicamente el DPM (diámetro ponderado medio de los agregados retenidos en los tamices luego del humedecimiento) y el Ea (porcentaje de agregados de tamaño superior a

0.425 mm luego del humedecimiento) en el  $IF_i$  de los suelos; algunos autores (Braunack y Dexter, 1979), sostienen que la cama de siembra óptima se obtiene con agregados de tamaños entre 0.5 y 8 mm, los cuales idealmente deben tener alta RR (baja friabilidad), mientras que otros investigadores (Tisdall y Adem, 1986), sugieren que los agregados ideales son aquellos que están entre 1 y 10 mm y son estables al humedecimiento. En la presente investigación el DPM no mostró efecto significativo sobre la friabilidad con el modelo estadístico utilizado, contrario a esto, el  $E_a$ , presentó efecto altamente significativo ( $p < 1\%$ ) (Tabla 4-2). Aunque de manera inferencial no se encontró significancia en el efecto del DPM sobre el  $IF_i$ , en la Tabla 4-4 se planteó de manera descriptiva el comportamiento de estas dos propiedades; allí se observó como en el horizonte superficial ( $A_p$ ) el  $IF_i$  tiende a incrementarse en la medida que se hace mayor el DPM (suelos más estables) en correspondencia con el decrecimiento de los valores de pH y CE, mientras que en el horizonte subsuperficial ( $A_1$ ) no se observó una tendencia clara del  $IF_i$  en relación con la estabilidad de los suelos, aunque se mantiene la tendencia decreciente del pH y la CE a medida que los agregados se hacen más estables. Por su parte, mediante análisis descriptivo se observó que el  $IF_i$  se incrementó en la medida en que los suelos presentaron un mayor  $E_a$ , excepto cuando este último fue menor del 25% (muy bajo estado de agregación) (Tabla 4-5).

**Tabla 4-4:** Índice de friabilidad en su límite inferior ( $IF_i$ ), diámetro ponderado medio (DPM), pH y conductividad eléctrica (CE) con relación a la estabilidad de los suelos bajo estudio.

Horizonte	Estabilidad del suelo*	$IF_i$	DPM (mm)	pH	CE mS/cm
$A_p$	Inestable	0.37	0.41	6.8	1.6
	Ligeramente estable	0.38	1.01	6.7	1.1
	Moderadamente estable	0.39	2.15	6.4	0.8
	Estable	0.42	3.70	5.5	0.6
$A_1$	Inestable	0.38	0.41	7.1	1.2
	Ligeramente estable	0.35	0.92	6.8	1.1
	Moderadamente estable	0.34	2.24	6.2	0.6
	Estable	0.35	3.93	5.5	0.6

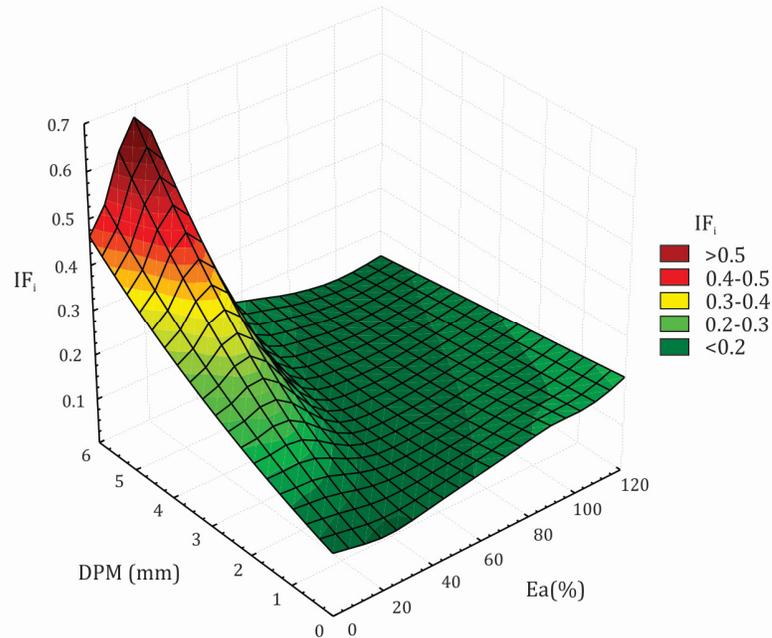
\*IGAC, 2006.

Analizado el comportamiento del  $IF_i$  a partir de la interacción del DPM y el  $E_a$  de los suelos (Figura 4-2), se observó como en los valores bajos de DPM ( $< 1.5$  mm), a medida que los suelos presentaron un mayor  $E_a$ , el  $IF_i$  mostró una tendencia al incremento; sin embargo, en valores de  $E_a$  menores al 25% (muy bajos) el  $IF_i$  se incrementó en la medida en que el DPM fue mayor. Cuando el  $E_a$  fue superior al 25% (bajos, medios y altos) el  $IF_i$  mostró tendencia al decrecimiento con el incremento del DPM.

**Tabla 4-5:** Estado de agregación ( $E_a$ ) e Índice de friabilidad en su límite inferior ( $IF_i$ ) de los suelos estudiados (horizontes  $A_p$  y  $A_1$ ).

$E_a$ (%)	$IF_i$ $A_p$	$IF_i$ $A_1$	$IF_i$ $A_p-A_1$
< 25	0.38	0.33	0.36
25 - 35	0.38	0.32	0.35
35 - 80	0.39	0.35	0.37
80 - 90	0.39	0.37	0.38
>90	0.45	0.35	0.40

**Figura 4-2:** Relación de las variables diámetro ponderado medio (DPM), estado de agregación (Ea) e índice de friabilidad en su límite inferior ( $IF_i$ ), obtenida por el método spline.

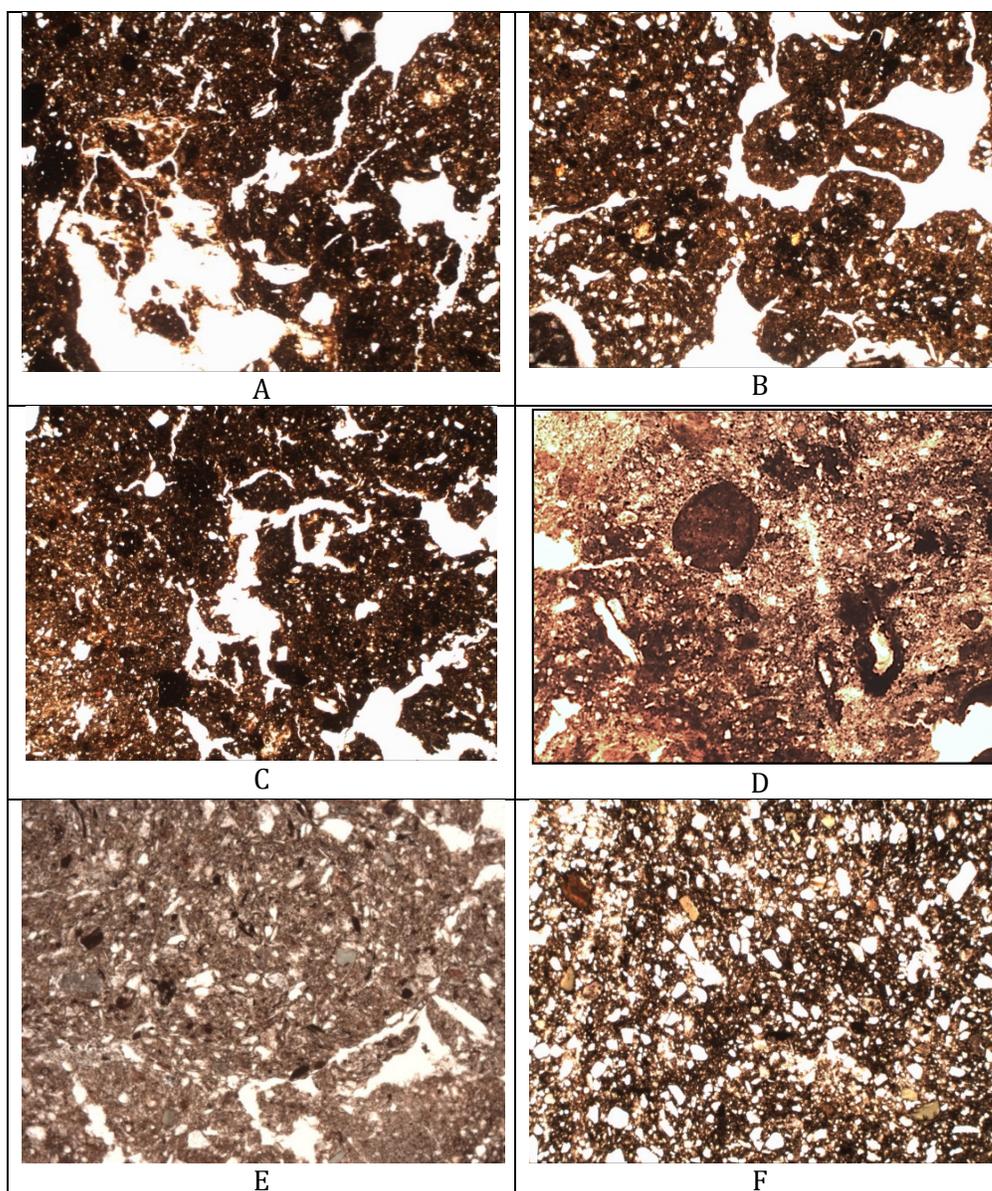


En esta investigación se evaluó también el efecto de algunas características químicas de los suelos sobre la friabilidad, específicamente se consideraron el pH y la CE. De acuerdo con [Munkholm \(2011\)](#) y [Kim et al. \(2007\)](#) se espera que los bajos valores de pH y saturación de bases provoquen altas resistencias en los suelos en condición seca; sin embargo, en este trabajo no se encontró significancia en el efecto del pH y la CE en el  $IF_i$  de los suelos. Del análisis descriptivo se encontró que en general en el horizonte Ap los valores de  $IF_i$  se comportaron de manera inversa a los de CE y pH en la medida que los suelos adquirieron mayor estabilidad (Tabla 4-4), lo cual coincide con lo reportado por [Rahimi et al. \(2000\)](#), quienes encontraron que los suelos con mayor CE presentaron a su vez las más altas RR, lo que podría interpretarse como una relación inversa entre CE e  $IF_i$ . Esta relación no se observó en el horizonte A1, donde el  $IF_i$  no mostró una tendencia clara en relación con el pH, la CE y la estabilidad de los suelos.

De otra parte, de acuerdo con [Dexter y Watts \(2001\)](#), la RR y por lo tanto la friabilidad son muy sensibles al desarrollo de microestructura y sugieren que la fragmentación puede estar relacionada con la microestructura existente en el suelo. En las secciones delgadas de algunos de los suelos estudiados se encontró que aquellos suelos que evidenciaron un claro desarrollo de microestructura (generalmente formas blocosas subangulares) y en los que además se observó un espacio poroso en forma de canales, cavidades y planares alargados en alrededor del 40 y 50% (porcentaje analizado en la sección delgada), presentaron valores de  $IF_i$  entre 0.45 y 0.52, considerados de acuerdo con [Imhoff et al. \(2002\)](#) como altos (Figuras 4-3A, B y C). Por el contrario, aquellos suelos que no presentaron desarrollo de microestructura (formas masivas), con material denso y menos del 20% de espacio poroso (porcentaje analizado en la sección delgada) presentaron  $IF_i$  bajos, con valores entre 0.26 y 0.37 (Figuras 4-3D, E y F). De acuerdo con [Dexter \(2004b\)](#),

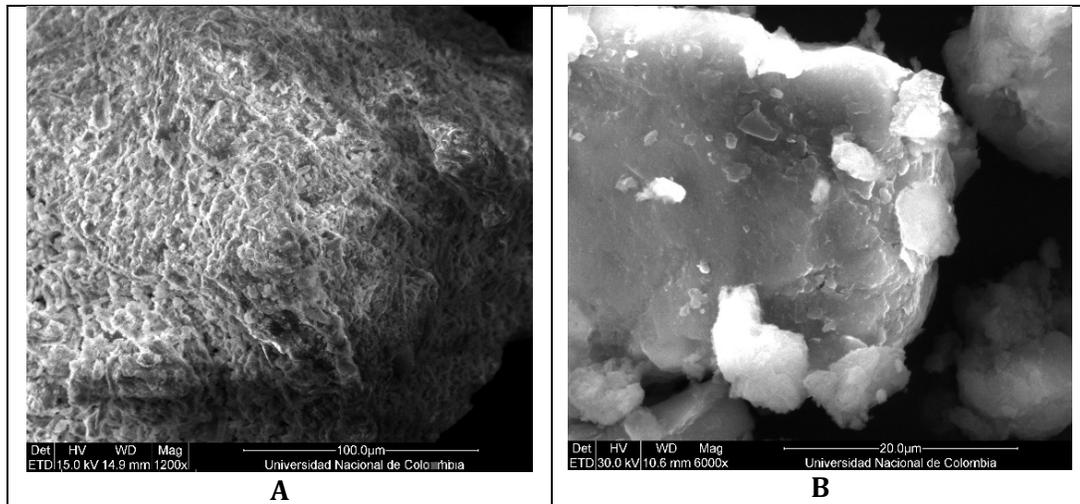
a partir de estereología se ha observado que solo los poros que aparecen como alargados e intercomunicados en las secciones planas pueden dividir el volumen de suelo en subvolúmenes incipientes que pueden convertirse posteriormente en agregados cuando el suelo se desmorona, mientras que poros lineales, como los canales originados por las raíces no tienen esta particularidad. Algunos resultados experimentales han confirmado la fuerte influencia de la porosidad en la fragmentación y RR de los suelos (Munkholm et al., 2002a).

**Figura 4-3:** Secciones delgadas de algunos de los horizontes Ap (NP:1.25 x10). A) Udertic Haplustalfs (IF<sub>i</sub>: 0.46), B) Typic Haplustepts (IF<sub>i</sub>: 0.52), C) Typic Calcicusterts (IF<sub>i</sub>: 0.45), D) Vertic Haplustalfs (IF<sub>i</sub>: 0.37), E) Petrocalcic Haplusterts (IF<sub>i</sub>: 0.30), F) Entic Haplusterts (IF<sub>i</sub>: 0.26).



De acuerdo con [Dexter y Watts \(2001\)](#), es posible que la forma de los agregados individuales del suelo influyan sobre la friabilidad; en este sentido, en un análisis complementario de los microagregados de algunos de los suelos estudiados (horizonte Ap), utilizando la técnica SEM (por sus siglas en inglés), se observó como las formas y superficies de los microagregados obtenidos a partir de muestras con diferente dominio en la mineralogía de la fracción arcilla presentaron una morfología característica. En aquellos donde el predominio fue de arcillas tipo 2:1 (esmectita y vermiculita), se observaron superficies rugosas, irregulares y muy porosas (Figura 4-4A), mientras que en los de predominio de arcillas tipo 1:1 (caolinita), las superficies se mostraron de forma laminar, plana y poco porosa (Figura 4-4B), originados, de acuerdo con la observación visual, a partir del empaquetamiento o ensamblaje de las láminas de arcilla. Se encontró que el primer grupo de microagregados se correspondió con suelos inestables a ligeramente estables (asociados a valores más bajos de  $IF_i$ ), mientras que el segundo grupo se correspondió con los suelos moderadamente estables a estables (asociados a valores más altos de  $IF_i$ ).

**Figura 4-4:** Microagregados de la fracción de suelo < 0.425 mm observados por SEM: A) microagregado de suelo con dominio de arcillas tipo 2:1 y B) microagregado de suelo con dominio de arcilla tipo 1:1.



## 4.6 Conclusiones

A partir del importante volumen de muestras utilizado, aspecto esencial para la confiabilidad de los resultados obtenidos, se encontró que la Pt y el Ea de los suelos presentaron un efecto altamente significativo en el  $IF_i$ . Se halló un incremento en el  $IF_i$  del suelo a mayor Pt, especialmente cuando esta última presentó valores por encima del 45%; así mismo, el  $IF_i$  se incrementó en la medida que los suelos presentaron un mayor Ea, excepto cuando este estuvo por debajo del 25% (bajo estado de agregación). Por consiguiente, se sugiere considerar la posibilidad de utilizar la Pt y el Ea como medida indirecta de la friabilidad, lo cual requiere mayor investigación en estas relaciones y considerar otros tópicos de la porosidad (macro y microporosidad).

El estudio no evidenció el efecto de la Da y el DPM de los agregados en el  $IF_i$  de los suelos (con el modelo lineal estadístico utilizado); sin embargo, a partir de análisis descriptivo se encontró que en el horizonte Ap se presentó un incremento del  $IF_i$  en la medida que los suelos mostraron un mayor DPM (suelos más estables), comportamiento que no se evidenció en el horizonte A1. Tampoco resultó significativo el efecto del pH y la CE en el  $IF_i$ , pero se observó un comportamiento inverso de estas variables químicas con relación a la estabilidad de los suelos. La ausencia de relaciones claras con el  $IF_i$  puede estar asociada a los bajos rangos de variación de algunas de las variables analizadas, por lo que se considera necesario replicar estos ensayos en suelos que presenten mayor rango de variación en estas propiedades.

Se encontró que los suelos con desarrollo de microestructura en bloques subangulares y espacio poroso entre el 40 y 50% (porcentaje analizado en la sección delgada) estuvieron relacionados con los valores más altos de  $IF_i$ , mientras que aquellos sin microestructura (masiva) y espacio poroso más reducido, menor del 20%, (porcentaje analizado en la sección delgada) se asociaron a los valores de  $IF_i$  más bajos; esto evidencia una relación positiva entre el desarrollo de microestructura y la friabilidad. Así mismo, los microagregados de suelos con dominio de minerales arcillosos 2:1 (esmectita y vermiculita), cuyas superficies se mostraron más rugosas e irregulares se asociaron con suelos inestables a ligeramente estables (valores bajos de  $IF_i$ ), mientras que aquellos con dominio de minerales tipo 1:1 (caolinita) de superficies laminares y planas se asociaron con suelos estables a moderadamente estables (mayores valores de  $IF_i$ ).

## 4.7 Agradecimientos

A la Universidad del Tolima, a COLCIENCIAS y a la Dirección de Investigaciones de la Universidad Nacional de Colombia por el apoyo económico; a los agricultores que permitieron en sus predios el muestreo de suelos; a CENICAÑA por el aporte de información y a los laboratorios de suelos de la Universidad Nacional de Colombia y el Instituto Geográfico Agustín Codazzi por la colaboración en la fase analítica de la investigación.

## 4.8 Referencias

Alaoui, A., Lipiec, J., Gerke, H.H., 2011. A review of the changes in the soil pore system due to soil deformation: a hydrodynamic perspective. *Soil Till. Res.* 1-15, 115-116.

American Society of Agronomy., 2002a. *Methods of Soil Analysis. Part 1: Physical and Mineralogical Methods.* Second Edition. Arnold Klute, Editor. Soil Science Society of America, Inc. Publisher Madison, Wisconsin USA, 1188 p.

American Society of Agronomy., 2002b. *Methods of Soil Analysis. Part 3: Chemical Methods.* Second Edition. Arnold Klute, Editor. Soil Science Society of America, Inc. Publisher Madison, Wisconsin USA, 1188 p.

Barzegar, A.R., Murray, R.X., Churchman, G.J.; Rengasamy, P., 1994. The strength of remoulded soils as affected by exchangeable cations and dispersible clay. *Aust. J. Soil Res.* 32, 185-199.

Barzegar, A.R., Oades, J.M., Rengasamy, P., Murray, R.S., 1995. Tensile strength of dry, remoulded soils as affected by properties of the clay fraction. *Geoderma* 65, 93-108.

Blanco-Canqui, H., Lal, R., Owens, L.B., Post, W.M., Izaurralde, R.C., 2005. Mechanical properties and soil organic carbon of soil aggregates in the northern Appalachians. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69, 1472-1481.

Blanco - Moure, N., Angurel, L.A., Moret-Fernández, D., López, M.V., 2012. Tensile strength and organic carbon of soil aggregates under long-term no tillage in semiarid Aragon (NE Spain). *Geoderma* 189-190, 423-430.

Braunack, M.V., Hewitt, J.S., Dexter, A.R., 1979. Brittle fracture of soil aggregates and the compaction of aggregate beds. *J. Soil Sci.* 30, 653-667.

Dexter, A.R., 1988a. Advances in characterization of soil structure. *Soil Till. Res.* 11, 199-238.

Dexter, A.R., 1997. Physical properties of tilled soil. *Soil Till. Res.* 43, 41-63.

Dexter, A.R., 2004a. Soil physical quality Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma* 120, 201-214.

Dexter, A.R., 2004b. Soil physical quality: Part II. Friability, tillage, tilth and hard-setting. *Geoderma* 120, 215-225.

Dexter, A.R., and Kroesbergen, B., 1985. Methodology for determination of tensile strength of soil aggregates. *J. Agr. Eng. Res.* 31, 139-147.

Dexter, A.R., Watts, C.W., 2001. Tensile strength and friability. In: Smith, K.A., Mullins, C.E. (Eds.), *Soil and Environmental Analysis: Physical Methods*. Segunda edición. Marcel Dekker Inc, New York, pp. 405-433.

Esengun, K., Erdal, G., Gunduz, O., Erdal, H., 2007. An economic analysis and energy use in stake-tomato production in Tokat province of Turkey. *Renew Ener.* 32, 1873-1881.

Etana, A., Larsbo, M., Keller, T., Arvidsson, J., Schjønning, P., Forkman, J., Jarvis, N., 2013. Persistent subsoil compaction and its effects on preferential flow patterns in a loamy till soil. *Geoderma* 192, 430-436.

Guérif, J., 1990. Factors influencing compaction-induced increases in soil strength. *Soil Till. Res.* 16, 167-178.

Guérif, J., Richard, G., Dürr, C., Machet, J.M., Recous, S., Roger Estrade, J., 2001. A review of tillage effects on crop residue management, seedbed conditions and seedling establishment. *Soil Till. Res.* 61, 13- 32.

Guimarães, R.M.L., Tormena, C.A., Alves, S.J., Fidalski, J., Blainski, E., 2009. Tensile strength, friability and organic carbon in an oxisol under a crop-livestock system. *Scientia Agricola*. (Piracicaba, Brasil.), Vol.66, No4, 499-505.

Hallett, P.D., Dexter, A.R., Seville, J.P.K., 1995a. Identification of pre-existing cracks on soil fracture surfaces using dye. *Soil Till. Res.* 33, 163–184.

Hallett, P.D., Dexter, A.R., Seville, J.P.K., 1995b. The application of fracture mechanics to crack propagation in dry soil. *Eur. J. Soil Sci.* 46, 591–599.

IBM., 2013. SPSS Statistics 22 Core System. User Guide. Copyright IBM Corporation, 302 p.

IGAC - Instituto Geográfico Agustín Codazzi., 2006. Estudio Detallado de Suelos y Capacidad de Uso de las Tierras Sembradas con Caña de Azúcar en el Valle Geográfico del Río Cauca. Bogotá.

IGAC - Instituto Geográfico Agustín Codazzi., 2006a. Métodos analíticos del laboratorio de suelos. Sexta edición. Bogotá, 674 p.

Imhoff, S., Da Silva, P.A., and Dexter, A.R., 2002. Factors contributing to the tensile strength and friability of Oxisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66, 1656-1661.

Kim, T.H., Kim, C.K., Jung, S.J., Lee, J.H., 2007. Tensile strength characteristics of contaminated and compacted sand-bentonite mixtures. *Environ. Geol.* 52, 653–661.

Kuncoro, P.H., Koga, K., Satta, N., Muto, Y., 2014. A study on the effect of compaction on transport properties of soil gas and water I: Relative gas diffusivity, air permeability, and saturated hydraulic conductivity. *Soil Till. Res.* 143, 172-179.

Macks, S.P., Murphy, B.W., Cresswell, H.P., and Koen, T.B., 1996. Soil friability in relation to management history and suitability for direct drilling. *Aust. J. Soil Res.* 34, 343-360.

Mullins, C.E., MacLeod, D.A., Northcote, K.H., Tisdall, J.M., and Young, I.M., 1990. Hardsetting soils: Behaviour, occurrence and management. *J. Adv. Soil Sci.* 11, 37-108.

Munkholm, L. J., 2011. Soil friability: A review of the concept, assessment and effects of soil properties and management (Review). *Geoderma* 167-168, 236–246.

Munkholm, L.J., Schjøning, P., Petersen, C.T., 2001. Soil mechanical behavior of sandy loams in a temperate climate: case studies on long-term effects of fertilization and crop rotation. *Soil Use Manage* (2001) 17, 269-277.

Munkholm, L.J., Schjøning, P., Kay, B.D., 2002a. Tensile strength of soil cores in relation to aggregate strength, soil fragmentation and pore characteristics. *Soil Till. Res.* 64, 125–135.

Munkholm, L.J., Schjøning, P., Debosz, K., Jensen, H.E., Christensen, B.T., 2002b. Aggregate strength and mechanical behaviour of a sandy loam soil under long-term fertilization treatments. *Eur. J. Soil Sci.* 53, 129–137.

Munkholm, L.J., Heck, R.J., Deen, B., 2012. Soil pore characteristics assessed from X-ray micro-CT derived images and correlations to soil friability. *Geoderma* 181-182, 22-29.

Perfect, E., Kay, B.D., 1994. Statistical characterization of dry aggregate strength using rupture energy. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58, 1804-1809.

Rahimi, H., Pazira, E., Tajik, F., 2000. Effect of soil organic matter, electrical conductivity and sodium adsorption ratio on tensile strength of aggregates. *Soil Till. Res.* 54, 145-153.

Sefeedpari, P., Shokoohi, Z., Behzadifar, Y., 2014. Energy use and carbon dioxide emission analysis in sugarcane farms: a survey on Haft-Tappeh Sugarcane Agro-Industrial Company in Iran. *Journal of Cleaner Production*, 83, 212-219.

Soil Science Society of America., 2002. *Methods of Soil Analysis. Part 4 Physical Methods.* Madison, Wisconsin, USA, 1692 p.

Statistical Analysis System - SAS., 2009. *SAS users guide; SAS/STAT – 9.3 (1) User’s guide the GLM procedure (Book excerpt)*, SAS Campus Drive, Cary North Carolina Rv. 27513, 206 p.

Tisdall, J.M., and Adem, H.H., 1986. Effect of water content of soil at tillage on size distribution of aggregates and infiltration. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 26, 193-195.

USDA., 2010. *Keys to Soil Taxonomy, Eleventh Edition.* By Soil Survey Staff. Natural Resources Conservation Service. Washington, D.C. USA, 365 p.

Utomo, W.H., Dexter, A.R., 1981. Soil friability. *J. Soil Sci.* 32, 203-213.

Watts, C.W., and Dexter, A.R., 1998. Soil friability: theory, measurement and the effects of management and organic carbon content. *Eur. J. Soil Sci.* 49, 73-84.

Yoder, R.E., 1936. A direct method of aggregates analysis and a study the physical nature of erosion losses. *J. Ame. Soc. Agron.* 28, 337-351.



# Capítulo 5. Friabilidad y su relación con el contenido de agua y el límite plástico en suelos dedicados al cultivo de caña de azúcar

**Relationship between friability and the moisture content and plastic limit of soils dedicated to sugar cane cultivation**

## 5.1 Resumen

La resistencia al rompimiento y el nivel de desagregación del suelo que es sometido a un esfuerzo mecánico, y por lo tanto su friabilidad, han sido asociados con el contenido de agua del medio edáfico. En este sentido, algunos investigadores han tratado de relacionar el contenido de agua en el que los suelos adquieren su máxima (óptima) friabilidad y aquel en el que alcanzan el límite plástico (LP), en procura de proveer alternativas de predicción de la friabilidad a partir de otras propiedades de fácil y rápida, pero confiable ejecución. En este estudio se determinó el contenido de agua en el que suelos cultivados en caña de azúcar adquirieron su condición de máxima (óptima) friabilidad y su relación con el LP. El índice de friabilidad en su límite inferior ( $IF_i$ ) fue estimado mediante el método de resistencia al rompimiento (RR), en agregados naturales de 5 tipos de suelos (Inceptisoles, Molisoles, Vertisoles, Alfisoles y Ultisoles); para ello se recolectaron 80 bloques de suelo (40 del horizonte Ap y 40 del horizonte A1), a partir de los cuales se separaron, mediante tamizado, agregados de tamaño entre 12.5 y 19 mm. De cada horizonte se seleccionaron 32 agregados y se dividieron en 4 grupos de 8 agregados; cada grupo se sometió a un potencial de presión específico (-10, -30, -100 y -300 kPa) y posteriormente cada agregado individualmente se sometió a una prueba de compresión para determinar la resistencia al rompimiento, y a partir de esta, el  $IF_i$  mediante el coeficiente de variación. Se ajustaron superficies cuadráticas utilizando polinomios de segundo orden y el criterio de optimización Hessiano; el análisis inferencial se realizó mediante correlación canónica. Mediante el modelo estadístico y matemático utilizado se estimó la máxima friabilidad en el horizonte Ap de los suelos en un valor del  $IF_i$  de 0.498 y en el horizonte A1 en un valor del  $IF_i$  de 0.410; estos valores de máxima friabilidad se asociaron a contenidos de agua de 332.04 y 279.89 g kg<sup>-1</sup> respectivamente y se correspondieron con potenciales de presión de -78.62 y -30.08 kPa. A partir de análisis de correlación canónica que incluyó las variables:  $IF_i$ , potenciales de presión (T), retención de agua (RA) y contenido de agua obtenido experimentalmente en el LP, se generó un modelo estadístico que permitió estimar el contenido de agua en el LP (ALP) para los suelos en su condición de máxima (óptima) friabilidad, tanto en Ap como en A1. Se encontró que el contenido de agua en los que los suelos bajo estudio presentaron su condición de máxima

(óptima) friabilidad (equivalente a su condición de contenido de agua óptimo para la labranza), correspondió, para el horizonte Ap, a la expresión  $0.88*ALP$ , y para el horizonte A1, a la expresión  $0.91*ALP$ .

**Palabras clave:** índice de friabilidad, resistencia al rompimiento, potencial de presión de agua, retención de agua, labranza.

## 5.2 Abstract

The tensile strength and disaggregation of soils that are subjected to a mechanical force, and therefore the friability, have been associated with the soil water content. In this sense, some research has tried to elucidate the soil water content at which the maximum (optimal) friability is obtained and at which the plastic limit (PL) is reached in order to provide options for predicting friability based on other properties in a way that is fast and easy but also reliable. The present study determined the water content in soils cultivated with sugar cane that had obtained their maximum (optimal) friability and the relationship with the PL. The lower limit of the friability index ( $FI_i$ ) was estimated with the tensile strength method (TS) using natural aggregates from 5 soil types (Inceptisols, Mollisols, Vertisols, Alfisols and Ultisols) obtained from 80 soil blocks (40 from the Ap horizon and 40 from the A1 horizon). Aggregates with a size between 12.5 and 19 mm were separated through sieving. For each horizon, 32 aggregates were separated and divided into 4 groups of 8 aggregates each. Each group was subjected to a specific pressure potential (-10, -30, -100 and -300 kPa); afterwards, each individual aggregate was subjected to a compressive test to determine the tensile strength, which was used to determine the  $FI_i$  using the coefficient of variation. Quadratic areas were fitted using second-order polynomials and the Hessian criterion of optimization. The inferential analysis was carried out with a canonical correlation. With the employed statistical and mathematical model, the maximum friability of horizon Ap was estimated at  $FI_i$  value of 0.498 and for the A1 horizon, it was estimated at an  $FI_i$  value of 0.410. These maximum friability values were associated with soil water contents of 332.04 and 279.89 g kg<sup>-1</sup>, respectively, and corresponded to pressure potentials of -78.62 and -30.08 kPa, respectively. A statistical model was generated from the canonical correlation analysis, which included the variables  $FI_i$ , pressure potential (P), water retention (WR) and water content experimentally obtained in the PL, that facilitated an estimation of the water content in the PL (MPL) of the soils at their maximum (optimal) friability for both Ap and A1. It was observed that the water content of the studied soils at their maximum (optimal) friability (equivalent to optimal moisture conditions for farming) corresponded to the expression  $0.88*MPL$  for the Ap horizon and to the expression  $0.91*MPL$  for the A1 horizon.

**Keywords:** friability index, tensile strength, water pressure potential, water retention, farming.

## 5.3 Introducción

La friabilidad varía en gran medida con el contenido de agua del suelo; por esta razón, para lograr una desagregación adecuada por labranza se requiere trabajarlo en condiciones óptimas de contenido de agua [Snyder et al. \(1995\)](#). Para [Munkholm \(2011\)](#), el contenido de agua afecta fuertemente la friabilidad del suelo, especialmente en dos aspectos: la resistencia del suelo no confinado y la fragmentación; para este autor, una baja friabilidad puede ser experimentada cuando el suelo está demasiado húmedo o demasiado seco. Lo anterior es reafirmado por [Utomo y Dexter \(1981\)](#), quienes encontraron en su trabajo experimental que suelos con escaso contenido de agua tienen un bajo valor de índice de friabilidad (IF) y un alto valor de resistencia al rompimiento (RR), es decir que los agregados y terrones son muy difíciles de romper o desagregar; por el contrario, los suelos con altos contenidos de agua presentan una RR relativamente baja y se rompen en fragmentos de tamaños arbitrarios por su muy alto valor de IF (suelos mecánicamente inestables), con lo cual se puede ver afectada negativamente la calidad del suelo. [Bhushan y Ghildyal \(1972\)](#), encontraron fragmentos grandes como resultado de operaciones de labranza en suelos con muy altos o muy bajos contenidos de agua. En este sentido, [Watts y Dexter \(1998\)](#) afirman que el laboreo del suelo con altos contenidos de agua puede repercutir en una disminución sustancial de la friabilidad e incremento de la resistencia con el posterior secado. El aumento de la resistencia del suelo con el decrecimiento del contenido de agua puede ser atribuido al incremento de las fuerzas de cohesión del agua ligada a los capilares ([Bishop, 1961](#)) y al aumento de la eficacia de los agentes cementantes ([Caron y Kay, 1992](#)).

De otra parte, [Utomo y Dexter \(1981\)](#), evaluando la friabilidad en agregados con diferente contenido de agua encontraron que los suelos fueron más friables cuando este contenido estuvo cercano al límite plástico. Varias ecuaciones se han reportado sobre el rango óptimo de agua para las operaciones de labranza, a partir de los contenidos de agua del suelo a capacidad de campo (CC) y en el límite plástico (LP) ([Abbaspour – Gilandeh y Sedghi, 2015](#)). [Mueller et al. \(2003\)](#), a partir de su trabajo experimental con 80 suelos diferentes proponen un contenido de agua de  $0.7 \times$  contenido de agua gravimétrica a  $-5$  kPa como límite seguro del máximo contenido de agua en el suelo para realizar las actividades de labranza. En este sentido, [Mosaddeghi et al. \(2009\)](#) evaluaron un modelo para la fragmentación en 10 suelos agrícolas de texturas franco arenosas a arcillosas y encontraron que los contenidos óptimos de agua en el suelo para la labranza, arrojados por el modelo para los diferentes suelos, estaban en el rango de  $0.79-0.91 \times$  ALP (contenido de agua en el límite plástico). Al respecto, [Dexter y Bird \(2001\)](#), quienes han definido el contenido de agua óptimo para la fragmentación del suelo como aquel contenido de agua en que la producción de pequeños agregados o fragmentos es la más alta con relación a la producción de agregados o fragmentos grandes, sugieren que el contenido óptimo de agua del suelo para la labranza se encuentra justo por debajo del contenido de agua del límite plástico ( $0.9 \times$  ALP). De acuerdo con [Munkholm \(2011\)](#), no se debe centrar la atención de la investigación en encontrar un contenido específico de agua en el que se logre la óptima desagregación del suelo, sino más bien establecer un rango de contenido de agua en el que los suelos, desde el punto de vista de la labranza, logren una fragmentación adecuada.

[Utomo y Dexter \(1981\)](#) por ejemplo, encontraron que los valores máximos del IF se obtuvieron con contenidos de agua correspondientes a un potencial de presión de  $-100$  kPa, mientras que [Munkholm et al. \(2002b\)](#) y [Munkholm y Kay \(2002\)](#), trabajando con un amplio grupo de suelos encontraron que la máxima friabilidad, determinada por los métodos de RR y la curva de retención de agua, se logró en los suelos aproximadamente entre  $-10$  y  $-100$  kPa de potencial de presión. De

otra parte, [Dexter \(2004 a y b\)](#), propone el punto de inflexión de la curva de retención de agua (indicativo del índice de calidad estructural del suelo "S"), como medida de la friabilidad, debido a que ambas variables (IF y S) dependen de la microestructura del suelo. Este autor encontró una fuerte y positiva correlación entre S y el IF en un estudio que incluyó suelos de textura franco arenosa, franco limosa, franco arcillosa y arcillosa; así mismo, sugiere, que el índice de calidad física o estructural del suelo, definido como S, puede ser medido fácilmente en el laboratorio, mientras que los equipos y métodos estandarizados para determinar la friabilidad están disponibles en pocos lugares. No obstante, [Munkholm \(2011\)](#), considera necesario tener presente que el índice S es una medida indirecta de la friabilidad que no proporciona información de la resistencia o fragmentación del suelo.

El objetivo de este estudio fue evaluar el contenido de agua en el que suelos cultivados con caña de azúcar adquieren su condición de óptima (máxima) friabilidad y su relación con el límite plástico.

## 5.4 Materiales y métodos

### 5.4.1 Sitios de observación y recolección de muestras de suelo

Este estudio se realizó en 18 fincas cultivadas en caña de azúcar localizadas en el Valle Geográfico del Río Cauca (Colombia), en los municipios de Cali, Jamundí, El Cerrito, Guacarí, Buga, Ginebra, Tuluá y Palmira (departamento del Valle del Cauca) y Caloto y Santander de Quilichao (departamento del Cauca). Los predios, cuyo manejo mecanizado del cultivo es en términos generales muy similar, se distribuyen geográficamente entre los 4°4'59" y 76°17'16" (finca del extremo norte del área), 3°3'1" y 76°30'43.2" (finca de los extremos sur y oeste) y 4°4'38.3" y 76°14'12.5" (finca del extremo este del área). En cada finca y a partir de un estudio detallado de suelos disponible ([IGAC, 2006](#)), se localizó una unidad taxonómica de suelos, y dentro de los límites de la misma, se situaron entre 1 y 3 sitios de observación. En cada sitio, distante entre sí aproximadamente 100 m, se abrió una cajuela de aproximadamente 50x50 cm de lado y 50 cm de profundidad en la que se delimitaron los dos primeros horizontes Ap y A1. En total se muestrearon 80 horizontes (40 de Ap y 40 de A1), de cada uno de ellos se tomó un bloque de suelo de alrededor de 30 x 18 cm de lado y 12 cm de espesor, cada bloque se envolvió en plástico adherente y bolsa plástica para evitar su alteración y mediante su empaque en cajas de madera fueron transportados al laboratorio. Adicionalmente se obtuvo aproximadamente 500 g de suelo de cada horizonte para la determinación del límite plástico de los suelos. En el anexo H se encuentran las principales propiedades y características de los suelos estudiados.

### 5.4.2 Saturación de los agregados con agua y posterior extracción a diferentes potenciales de presión

A partir de los bloques de suelo obtenidos en el campo (40 bloques del horizonte Ap y 40 del horizonte A1), se procedió en el laboratorio a separar en cada uno de ellos manualmente sus agregados constituyentes, sin forzar la separación de los agregados por sitios diferentes a los planos naturales de debilidad de cada bloque. Mediante el uso de tamices, se separaron los agregados de tamaño entre 12.5 y 19.0 mm, que de acuerdo con [Imhoff et al. \(2002\)](#) y [Guimarães et al. \(2009\)](#), corresponde al tamaño de agregados de más fácil manejo y medición

y, adicionalmente, a que es el rango de tamaño de agregados que normalmente predominan después de las actividades de labranza.

Posteriormente, tal como se observa en el diseño del experimento (Anexo I, parte 2), se seleccionaron de cada horizonte 32 agregados que se separaron en 4 grupos de 8 agregados cada uno y se llevaron a saturación por capilaridad durante 48 horas utilizando anillos plásticos de 5 cm de diámetro y 1 cm de altura. Luego de logrado el punto de saturación (brillo metálico en la superficie de los agregados), cada grupo de 8 agregados se sometió en la membrana de Richards a un potencial de presión específico: -10, -30, -100 y -300 kPa respectivamente (Munkholm y Kay, 2002). Una vez que cada grupo de agregados se estabilizó en el respectivo potencial de presión, se sacó del equipo de retención de agua, se colocaron uno a uno los 8 agregados de cada potencial en un recipiente plástico con cierre hermético para evitar pérdida o ganancia de humedad del ambiente y se llevaron a pesaje individual en balanza analítica. Una vez pesado cada uno de los 8 agregados sometidos a un potencial de presión determinado, se llevaron, en el mismo recipiente plástico, herméticamente cerrado, hasta el equipo de compresión para la prueba de RR.

### 5.4.3 Estimación del índice de friabilidad a diferentes contenidos de agua del suelo

La RR se determinó a partir de la prueba de compresión propuesta por Utomo y Dexter (1981) y Dexter y Watts (2001), usando una prensa mecánica CBR (Soiltext - CF410) de dos velocidades. En total se sometieron a prueba de compresión 2560 agregados correspondientes a 32 agregados de 80 horizontes (40 horizontes Ap y 40 horizontes A1), llevados a 4 potenciales de presión diferentes: -10, -30, -100 y -300 kPa. Los 2560 agregados fueron sometidos a compresión hasta lograr su rompimiento aplicando carga a una velocidad de deformación constante de  $0.07 \text{ mm s}^{-1}$  (Watts y Dexter, 1998).

La RR del total de los agregados (generalmente expresada en kPa) se determinó mediante la relación del valor del pico de fuerza registrado al momento de la ruptura de cada agregado  $P$  (N), el diámetro efectivo del conjunto de agregados de cada horizonte  $D_e$  (m) y una constante de proporcionalidad (0.576) (Utomo y Dexter, 1981 y Dexter y Kroesbergen (1985):

$$RR = 0.576 (P/D_e^2) \quad (5.1)$$

El índice de friabilidad se estimó para los agregados sometidos a cada tensión aplicada (640 agregados por cada potencial de presión), a partir del coeficiente de variación propuesto inicialmente por Watts y Dexter (1998), tomando como referencia el límite inferior del intervalo de confianza ( $IF_i$ ) por ser el valor que más se acerca a la determinación del IF de manera multivariante. La ecuación propuesta por Watts y Dexter (1998) relaciona la desviación estándar de los valores medidos de RR ( $\sigma_y$ ), la media de la RR medida en  $n$  réplicas ( $\bar{Y}$ ) y el error estándar del coeficiente de variación (segundo término):

$$IF = \frac{\sigma_y}{\bar{Y}} \pm \frac{\sigma_y}{\bar{Y}\sqrt{2n}} \quad (5.2)$$

#### 5.4.4. Determinación del límite plástico de los suelos

El límite plástico se obtuvo para cada uno de los 80 horizontes muestreados a partir de una masa de aproximadamente 25 gr de suelo (previamente tamizado por malla de 425  $\mu\text{m}$ ) que mediante humedecimiento lento, compresión y enrollamiento entre los dedos y una superficie lisa permitió la formación de rollos de aproximadamente 6 cm de largo y 3 mm de diámetro (IGAC, 2006a; American Society of Agronomy, 2002a). Los rollos, cuya tasa de enrollamiento fue de entre 80 y 90 pasadas por minuto, una vez adquirieron el diámetro de 3 mm y mostraron fisuras de agrietamiento fueron pesados y posteriormente llevados a secado en estufa a 105°C durante 24 horas. El contenido de agua al cual los suelos alcanzaron el límite plástico se obtuvo mediante la diferencia del pesaje en húmedo y posteriormente en seco, de los rollos de suelo.

#### 5.4.5. Principales características de los suelos estudiados

Los suelos muestreados pertenecen a los órdenes Inceptisol, Vertisol, Molisol, Alfisol y Ultisol localizados en planos de terraza de la llanura aluvial del Río Cauca con pendientes que oscilan entre 1 y 3%. Estos suelos son en general moderadamente profundos a profundos y bien a imperfectamente drenados; sus contenidos de carbono orgánico varían entre 10.3 y 21.7  $\text{g kg}^{-1}$  y muestran un predominio de las fracciones arcilla y limo (Tabla 5-1). Las principales propiedades y características de los suelos estudiados se encuentran en el Anexo H.

**Tabla 5-1:** Valores ponderados de los contenidos de arena, limo, arcilla y carbono orgánico de los suelos estudiados.

Taxonomía (orden)	Horizonte	Arena ( $\text{g kg}^{-1}$ )	Limo ( $\text{g kg}^{-1}$ )	Arcilla ( $\text{g kg}^{-1}$ )	Carbono orgánico ( $\text{g kg}^{-1}$ )
Inceptisol	Ap	253	517	230	12.1
	A1	205	610	185	10.3
Vertisol	Ap	195	362	443	16.8
	A1	165	407	427	15.4
Molisol	Ap	257	407	336	16.4
	A1	256	419	325	15.3
Alfisol	Ap	95	287	618	21.7
	A1	91	326	583	19.6
Ultisol	Ap	111	326	563	19.8
	A1	119	332	550	19.5

Estos suelos presentan capacidad de retención de agua que varía en el horizonte Ap desde los 356.3  $\text{g kg}^{-1}$  a los -10 kPa potencial de presión, hasta los 283.1  $\text{g kg}^{-1}$  a los -300 kPa potencial de presión (Tabla 5-2); y en el horizonte A1 desde los 384.8  $\text{g kg}^{-1}$  a los -10 kPa, hasta los 249.9  $\text{g kg}^{-1}$  a los -300 kPa. Así mismo, la media de los contenidos de agua de los suelos en el LP, es de 264.4  $\text{g kg}^{-1}$  en el horizonte Ap, y de 269.0  $\text{g kg}^{-1}$  en el horizonte A1.

**Tabla 5-2:** Valores promedios ponderados de los contenidos de agua en el límite plástico y en los potenciales de presión de -10, -30, -100 y -300 kPa para los horizontes Ap y A1 de los suelos bajo estudio.

Taxonomía (orden)	Horizonte	Contenido de agua obtenido experimentalmente en el límite plástico (mínimo/máximo) (g kg <sup>-1</sup> )	Agua retenida a -10 kPa (g kg <sup>-1</sup> )	Agua retenida a -30 kPa (g kg <sup>-1</sup> )	Agua retenida a -100 kPa (g kg <sup>-1</sup> )	Agua retenida a -300 kPa (g kg <sup>-1</sup> )
Inceptisol	Ap	217.2*	329.6	289.4	250.8	173.6
	A1	193.3*	309.5	278.2	226.7	180.7
Vertisol	Ap	159.5/369.2	328.7	301.8	282.3	240.5
	A1	160.7/377.2	348.2	317.9	298.7	246.8
Molisol	Ap	160.9/292.8	298.1	263.9	249.9	211.4
	A1	173.3/307.4	314.1	276.4	258.1	222.0
Alfisol	Ap	273.0/337.2	356.3	325.8	321.5	283.1
	A1	267.4/353.2	384.8	355.8	338.4	249.9
Ultisol	Ap	257.4/309.6	306.3	278.9	261.4	241.1
	A1	214.2/303.5	322.0	287.2	272.8	246.6

\* De este tipo de suelo solo un horizonte Ap y un horizonte A1 presentaron límite plástico.

## 5.4.6 Análisis estadístico

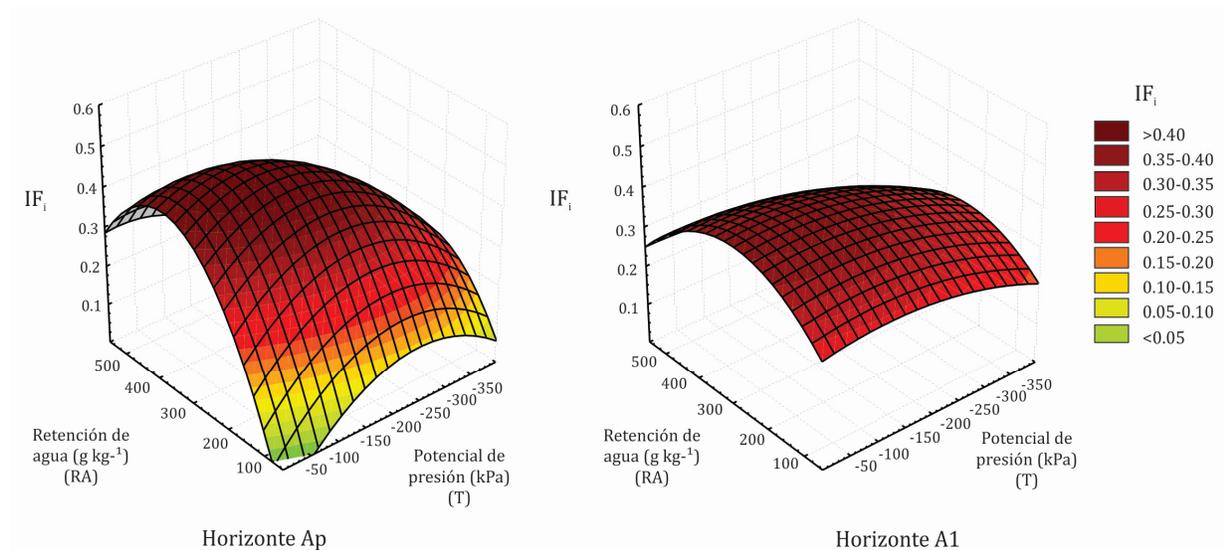
El análisis estadístico involucró los componentes descriptivo e inferencial (Anexo F). En el primer caso se ajustaron superficies cuadráticas utilizando polinomios de segundo orden en los diagramas tridimensionales, a partir del criterio de los mínimos cuadrados de las distancias ponderadas. En cada modelo cuadrático se utilizó el criterio de optimización denominado Hessiano (Larson et al., 2011), para obtener los valores máximos del índice de friabilidad asociados a los puntos críticos de potencial de presión de agua y agua retenida. El componente inferencial se basó en la obtención de dos modelos de correlación canónica (Tabachnick y Fidell, 2007) y, a partir del modelo que mostró mayor significancia estadística junto con los valores del  $IF_i$  (en condición de óptima friabilidad) y sus puntos críticos para RA y T, se obtuvo los contenidos de agua en el LP (ALP) de los suelos.

## 5.5 Resultados y discusión

Las variables índice de friabilidad en su límite inferior ( $IF_i$ ), potenciales de presión (-10, -30, -100 y -300 kPa) y la retención de agua (g kg<sup>-1</sup>) lograda en cada potencial de presión se visualizaron en diagramas tridimensionales (ajustados mediante superficies cuadráticas) para los horizontes Ap y A1 de la totalidad de los suelos (Figura 5-1). Es evidente la presencia de valores extremos en cada caso, por lo que a los modelos cuadráticos usados para ajustar los datos asociados a la retención de agua (RA) y potencial de presión (T) se les aplicó el criterio Hessiano (Larson et al., 2011), que permitió hallar los valores máximos del índice de friabilidad ( $IF_i$ ) asociado a los puntos críticos de RA y T. Las regiones más oscuras de la Figura 5-1 se presentaron en los puntos más altos del  $IF_i$ , con valores superiores a 0.4. Se percibió además, que el máximo valor del  $IF_i$  se localizó cerca del centro del plano que conforman el RA y T. En el Anexo F se describe el procedimiento estadístico y matemático que permitió generar los

valores máximos (en este caso óptimos) del  $IF_i$  para el total de los suelos estudiados, tanto en el horizonte Ap, como en A1.

**Figura 5-1:** Relación del índice de friabilidad en su límite inferior ( $IF_i$ ), potencial de presión (T) y retención de agua (RA) a cada potencial de presión para los horizontes Ap y A1, obtenida mediante superficies cuadráticas.



En la Tabla 5-3 se presentan los valores máximos de friabilidad encontrados para los suelos estudiados, así como el potencial de presión y la retención de agua asociados a los mismos. El valor óptimo de friabilidad de los suelos en el horizonte Ap se encontró a una tensión de -78.62 kPa y a un contenido de agua de 332.04  $g\ kg^{-1}$ ; en el horizonte A1 la máxima friabilidad se correspondió con una tensión de -30.08 kPa y un contenido de 279.89  $g\ kg^{-1}$  de agua; resultados que parecen estar asociados a las diferencias en la textura y contenido de CO de los suelos. Estos valores concuerdan con lo encontrado por [Utomo y Dexter \(1981\)](#) en suelos francos y franco arenosos de Australia, trabajando con agregados de 10 mm de tamaño; quienes encontraron máximos valores de friabilidad a contenidos de agua correspondientes a un potencial de presión de -100 kPa. Resultados similares fueron reportados por [Munkholm y Kay \(2002\)](#) y [Munkholm et al. \(2002b\)](#) en suelos franco arenosos de Dinamarca, en los que el valor máximo de índice de friabilidad (basado en el método de RR) se encontró entre -10 y -100 kPa y entre -30 y -100 kPa potencial de presión respectivamente. La máxima friabilidad obtenida en este rango de potencial de presión en la presente investigación, guarda cierta coincidencia también con los resultados de fragmentación del suelo obtenidos por [Snyder et al. \(1995\)](#), quienes encontraron la máxima fragmentación de suelos franco arcillo limosos entre -40 y -70 kPa. [Utomo y Dexter \(1981\)](#), [Shanmuganathan y Oades \(1982\)](#) y [Watts y Dexter \(1998\)](#), encontraron que en general la máxima friabilidad, tanto en agregados naturales como remoldeados, se logró a contenidos de agua del suelo cercanos al LP.

**Tabla 5-3:** Valores óptimos del  $IF_i$  y sus puntos críticos para RA y T en los suelos estudiados.

Horizonte	$IF_i$	RA (g kg <sup>-1</sup> )	T (kPa)
Ap	0.498	332.04	-78.62
A1	0.410	279.89	-30.08

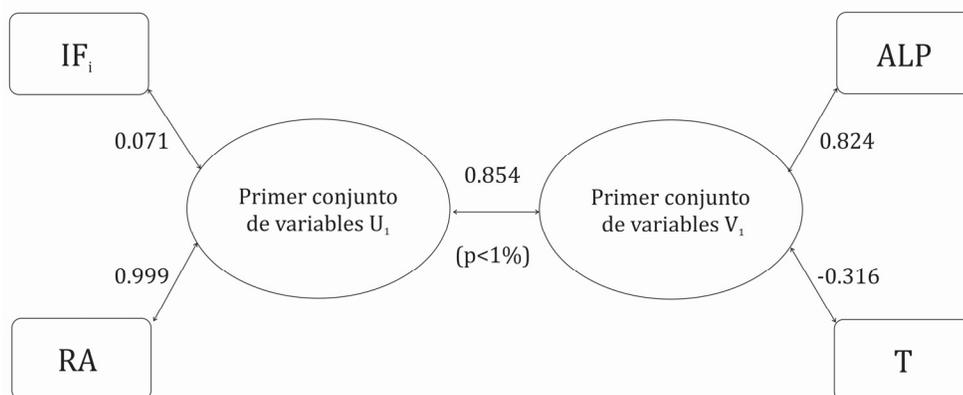
En la Tabla 5-4 y las Figuras 5-2 y 5-3 se observa como en la primera correlación canónica el valor de la correlación entre el par de variables ( $IF_i$ , RA) y (ALP, T) es de 0.854 (con  $p < 1\%$ ), esto es altamente significativa, mientras que en la segunda, la correlación es de 0.178 ( $p < 5\%$ ), denotando la mayor significancia estadística de la primera correlación. Las variables fueron inicialmente estandarizadas restándoles primero sus medias y dividiéndolas entre sus desviaciones estándar. La Tabla 5-4 muestra las correlaciones estimadas entre cada conjunto de variables canónicas y dado que los dos valores de P son menores de 0.05, esos conjuntos tienen una correlación estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 95.0%.

**Tabla 5-4:** Correlaciones canónicas y significancia asociada.

Número de correlaciones	Eigen valor	Correlación canónica	Lambda de Wilks	Chi-cuadrada	GL	Valor-P
1	0,728886	<b>0,853748</b>	0,262511	260,136	4	0,0000
2	0,0317334	<b>0,178139</b>	0,968267	6,27221	1	0,0123

Para estimar el contenido de agua en el LP (ALP) de los suelos, cuando estos adquirieron su condición de máxima (óptima) friabilidad, se utilizó análisis de correlación canónica. El diagrama de la Figura 5-2 exhibe la primera correlación canónica en la que se muestra la correlación entre los dos pares de variables y las correlaciones de cada variable con el primer conjunto, sea este  $U_1$  o  $V_1$ . La variable RA es la más correlacionada con el conjunto  $U_1$  (0.999), mientras que ALP es la más correlacionada con el conjunto  $V_1$  (0.824). Al final del diagrama se presenta el modelo de esta correlación canónica, el cual se usó posteriormente para estimar los valores del ALP (g kg<sup>-1</sup>) para la máxima (óptima) friabilidad de los suelos estudiados (tanto en Ap como en A1), partiendo de los resultados obtenidos de la Tabla 5- 3.

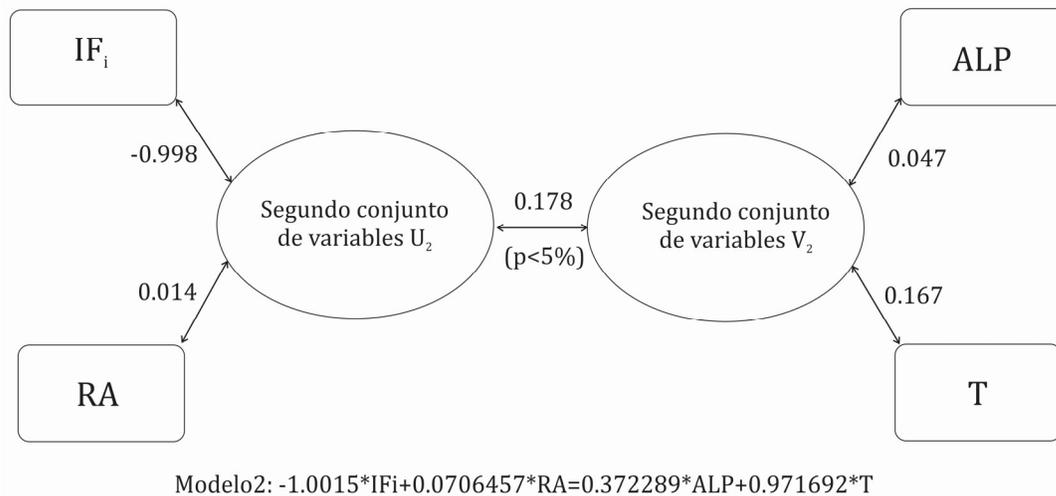
**Figura 5-2:** Diagrama del primer conjunto de variables canónicas y sus correlaciones canónicas.



$$\text{Modelo1: } 0.0140628 * IF_i + 0.999107 * RA = 0.935236 * ALP - 0.262833 * T$$

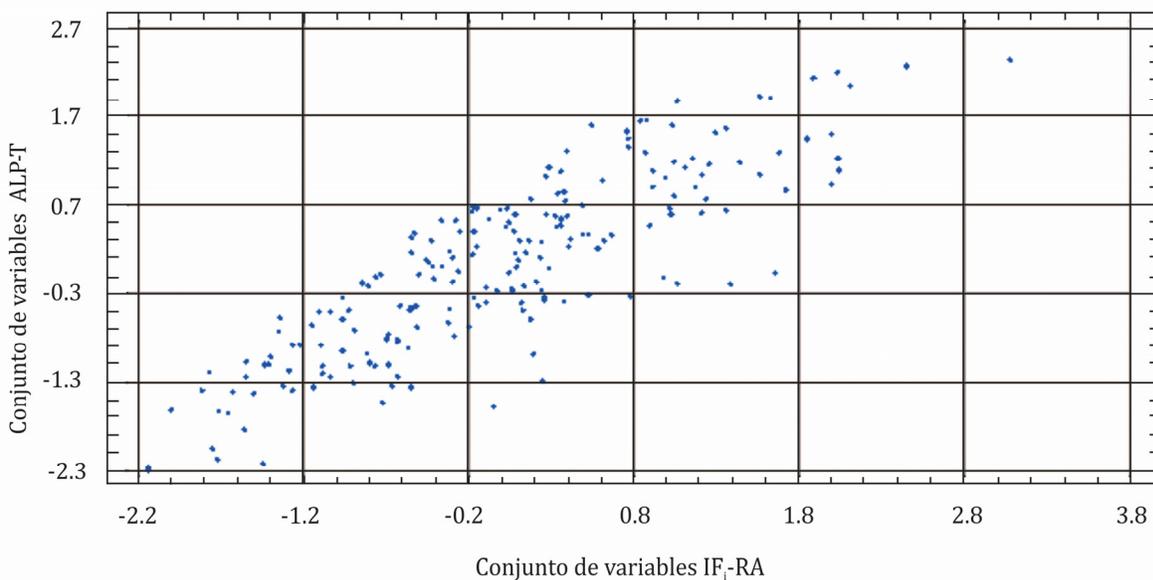
El diagrama de la Figura 5-3 resume los resultados de la segunda correlación canónica, sin embargo, la discusión clave se realiza con los valores del modelo de la primera correlación por su mayor significancia estadística.

**Figura 5-3:** Diagrama del segundo conjunto de variables canónicas y sus correlaciones canónicas.



La Figura 5-4 presenta el diagrama de dispersión de la primera correlación canónica entre el par de variables  $U_1$  y  $V_1$  (en los ejes coordenados se presentan las variables involucradas); es clara la relación lineal entre el conjunto  $U_1$  y  $V_1$ , por lo que esta se utilizó para estimar el ALP en la condición de máxima friabilidad de los suelos estudiados.

**Figura 5-4:** Diagrama de dispersión para las variables canónicas del primer modelo de correlación.



En la tabla 5-5 se muestra el grado en el que las variables canónicas del primer modelo pueden explicar la variabilidad en las variables del grupo. Por ejemplo, se observa aquí que la primera variable canónica (IF<sub>i</sub>, RA) explica el 50,24% de la variabilidad en las variables IF<sub>i</sub>, RA, mientras que para el par opuesto (ALP, T) se explica un 36.62%. En el grupo V<sub>1</sub>, la variabilidad explicada en sus propias variables es 53.43%, mientras que con las variables opuestas es 38,94%. El coeficiente de determinación es aceptable (72.89%) y la mejor varianza explicada se logra en el grupo V<sub>1</sub> con sus propias variables (ALP y T).

**Tabla 5-5:** Análisis de redundancia canónica.

<b>Varianza estandarizada del par de variables: IF<sub>i</sub> y retención de agua del suelo (RA)</b>			
Variables canónicas	Sus propias variables canónicas (proporción)	R cuadrado canónico	Variables canónicas opuestas (proporción)
Conjunto 1	0.5024	0.7289	0.3662
Conjunto 2	0.4976	0.0317	0.0158

<b>Varianza estandarizada del par de variables: contenido de agua en el límite plástico (ALP) y potencial de presión (T)</b>			
Variables canónicas	Sus propias variables canónicas (Proporción)	R cuadrado canónico	Variables canónicas opuestas (Proporción)
Conjunto 1	0.5343	0.7289	0.3894
Conjunto 2	0.4657	0.0317	0.0148

Un óptimo contenido de agua para la fragmentación del suelo se ha definido como el contenido de agua donde la producción de pequeños fragmentos es alta respecto a la producción de elementos grandes (Dexter y Bird, 2001). Este también es considerado el contenido de agua óptimo para la labranza (Munkholm, 2011). En este sentido, el contenido de agua en el cual el suelo alcanza su máxima (óptima) friabilidad está estrechamente relacionado con el contenido de agua óptimo para la labranza (CAOL). Al respecto, Utomo y Dexter (1981), encontraron la máxima friabilidad a un contenido de agua del suelo cercano al LP. En la presente investigación, se utilizó el primer modelo de correlación canónica (Figura 5-2) para estimar el ALP de los suelos en su condición de máxima (óptima) friabilidad; para lo cual se emplearon los valores de IF<sub>i</sub>, RA y T obtenidos en la Tabla 5-3. Relacionando el ALP con el contenido de agua retenido en los suelos en su condición de máxima (óptima) friabilidad, se encontró que la expresión que se aproxima al contenido de agua óptimo para la labranza (equivalente al de máxima friabilidad) en los suelos estudiados está dada por 0.88\*ALP para el horizonte Ap, y por 0.91\*ALP para el horizonte A1 (Tabla 5-6). Estos resultados concuerdan con lo encontrado por varios investigadores en diferentes tipologías de suelos, quienes sugieren que el contenido de agua óptimo para la labranza está alrededor del contenido de agua en el que el suelo logra su límite plástico; por ejemplo, Mosaddeghi et al. (2009) trabajando con suelos franco arenosos y arcillosos encontraron dicho contenido de agua en el rango de 0.79-0.91\*ALP, Arndt (1964) y Dexter y Bird (2001) encontraron en su trabajo experimental ese contenido de agua en 0.90\*ALP, estado en el que encontraron la mayor cantidad de pequeños agregados luego de la labranza en experimentos de campo. De igual forma, Ojeniyi y Dexter (1979) encontraron la mayor cantidad de pequeños agregados luego de la labranza a un contenido de agua del suelo entre 0.84\*ALP y 0.90\*ALP. Sin embargo, de acuerdo con Dexter y Bird (2001), el contenido de

agua de un suelo apto para la labranza se acerca más a la relación: contenido de agua del suelo a capacidad de campo (ACC) < contenido de agua en el límite plástico (ALP). De acuerdo con estos mismos autores estas relaciones pueden tener como limitante que ALP es una propiedad determinada en suelo moldeado y no en condiciones de suelo inalterado, además que algunos suelos arenosos no tienen límite plástico. Con relación a este último aspecto, [Dexter y Bird \(2001\)](#) consideran que la labranza de suelos arenosos es compleja, ya que puede causar daño estructural.

**Tabla 5-6:** Contenidos de agua en la máxima (óptima) friabilidad, en el límite plástico y el considerado óptimo para la labranza de los suelos estudiados.

Horizonte	IF <sub>i</sub>	Contenido de agua a la máxima friabilidad (g kg <sup>-1</sup> )	Contenido de agua en el límite plástico (ALP), a partir de máxima friabilidad (g kg <sup>-1</sup> )	Predicción del contenido de agua óptimo para la labranza (g kg <sup>-1</sup> )
Ap	0.498	332.04	376.82	0.88*ALP
A1	0.410	279.89	307.46	0.91*ALP

## 5.6 Conclusiones

El valor de máxima (óptima) friabilidad de los suelos estudiados (a diferentes contenidos de agua) fue de IF<sub>i</sub>= 0.498 en el horizonte Ap y de IF<sub>i</sub>= 0.410 en el horizonte A1. Estos valores de índice de friabilidad corresponden, de acuerdo con la clasificación de [Imhoff et al. \(2002\)](#), a suelos friables; esto es, suelos con moderada a baja resistencia al rompimiento, que pueden requerir pocos pases de labranza para obtener una capa arable con el tamaño adecuado de agregados, generalmente asociados con calidad estructural moderada a alta.

La máxima friabilidad de los suelos estudiados se alcanzó a un contenido de agua de 332.04 g kg<sup>-1</sup> en el horizonte Ap y de 279.89 g kg<sup>-1</sup> en el horizonte A1. Estos contenidos de agua se lograron a potenciales de presión de -78.62 kPa en el horizonte Ap y de -30.08 kPa en el horizonte A1. Esto confirma la fuerte tendencia de los suelos a presentar su condición de máxima (óptima) friabilidad a contenidos de agua logrados en el rango de potenciales de presión entre -30 y -100 kPa.

Se comprobó la cercanía del valor del contenido de agua en el que los suelos bajo estudio alcanzaron su condición de máxima (óptima) friabilidad y el contenido de agua en el límite plástico (ALP), determinado en el material de suelo de tamaño inferior a 425 μm. En el horizonte Ap, este contenido de agua correspondió a la relación 0.88\*ALP, mientras que en A1 correspondió a 0.91\*ALP. En este sentido, se considera de gran relevancia que los resultados muestran la posibilidad de predecir el contenido de agua en el que se logra la condición de óptima friabilidad a partir del límite plástico de los suelos.

## 5.7 Agradecimientos

A la Universidad del Tolima, a COLCIENCIAS y a la Dirección de Investigaciones de la Universidad Nacional de Colombia por el apoyo económico; a los agricultores que permitieron en sus predios el muestreo de suelos; a CENICAÑA por el aporte de información y a los laboratorios de suelos de la Universidad Nacional de Colombia, Universidad del Tolima y el Instituto Geográfico Agustín Codazzi por la colaboración en la fase analítica de la investigación.

## 5.8 Referencias

Abbaspour – Gilandeh, Y., Sedghi, R., 2015. Predicting Soil fragmentation during tillage operation using fuzzy logic approach. *J. Terramechanics* 57, 61-69.

American Society of Agronomy., 2002a. *Methods of Soil Analysis. Part 1: Physical and Mineralogical Methods*. Second Edition. Arnold Klute, Editor. Soil Science Society of America, Inc. Publisher Madison, Wisconsin USA, 1188 p.

Arndt, W., 1964. Investigations of some physical problems of Katherine soils leading to proposals for considering new systems of cultivation for the summer rainfall environment. Division of Land Research and Regional Survey. Technical Memorandum 64/3, Melbourne.

Bhushan, L. S., and Ghildyal, B. P., 1972. Influence of radius of curvature of mouldboard on soil structure. *Indian J. Agr. Sci.* 42, 1-5.

Bishop, A.W., 1961. The measurement of pore pressure in the triaxial test. *Pore Pressure and Suction in Soils*. Butterworths, London, pp. 38–46.

Caron, J., Kay, B.D., 1992. Rate of response of structural stability to a change in water content: Influence of cropping history. *Soil Till. Res.* 25, 167–185.

Dexter, A.R., and Kroesbergen, B., 1985. Methodology for determination of tensile strength of soil aggregates. *J. Agr. Eng. Res.* 31, 139–147.

Dexter, A.R., Watts, C.W., 2001. Tensile strength and friability. In: Smith, K.A., Mullins, C.E. (Eds.), *Soil and Environmental Analysis: Physical Methods*. Segunda edición. Marcel Dekker Inc, New York, pp. 405–433.

Dexter, A.R., 2004a. Soil physical quality Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma* 120, 201-214.

Dexter, A.R., 2004b. Soil physical quality: Part II. Friability, tillage, tilth and hard-setting. *Geoderma* 120, 215–225.

Dexter, A.R., Bird, N.R.A., 2001. Methods for predicting the optimum and the range of soil water contents for tillage based on the water retention curve. *Soil Till. Res.* 57, 203–212.

Guimarães, R.M.L., Tormena, C.A., Alves, S.J., Fidalski, J., Blainski, E., 2009. Tensile strength, friability and organic carbon in an oxisol under a crop-livestock system. *Sci Agri. (Piracicaba, Brasil.)* 66 (4), 499-505.

IGAC - Instituto Geográfico Agustín Codazzi., 2006. Estudio Detallado de Suelos y Capacidad de Uso de las Tierras Sembradas con Caña de Azúcar en el Valle Geográfico del Río Cauca. Bogotá.

IGAC - Instituto Geográfico Agustín Codazzi., 2006a. Métodos analíticos del laboratorio de suelos. Sexta edición. Bogotá, 674 p.

Imhoff, S., Da Silva, P.A., and Dexter, A.R., 2002. Factors contributing to the tensile strength and friability of Oxisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66, 1656-1661.

Larson, R.E., Hostetler, R.P., Edwards, B.H., 2011. Cálculo y geometría analítica. Sexta edición, volumen 2. Mc Graw Hill, 1495 p.

Mosaddeghi, M.R., Morshedizad, M., Mahboubi, A.A., Dexter, A.R., Schulin, R., 2009. Laboratory evaluation of a model for soil crumbling for prediction of the optimum soil water content for tillage. *Soil Till. Res.* 105, 242-250.

Mueller, L., Schindler, U., Fausey, N.R., Lal, R., 2003. Comparison of methods for estimating maximum soil water content for optimum workability. *Soil Till. Res.* 72, 9-20.

Munkholm, L. J., 2011. Soil friability: A review of the concept, assessment and effects of soil properties and management (Review). *Geoderma* 167-168, 236-246.

Munkholm, L.J., and Kay, B.D., 2002. Effect of Water Regime on Aggregate-tensile Strength, Rupture Energy, and Friability. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66, 702-709.

Munkholm, L.J., Schjøning, P., Deboz, K., Jensen, H.E., Christensen, B.T., 2002b. Aggregate strength and mechanical behaviour of a sandy loam soil under long-term fertilization treatments. *Eur. J. Soil Sci.* 53, 129-137.

Ojeniyi, S.O., Dexter, A.R., 1979. Soil factors affecting the macrostructures produced by tillage. *Trans. Am. Soc. Agr. Eng.* 22, 339-343.

Shanmuganathan, R.T.; Oades, J.M., 1982. Modification of soil physical properties by manipulating the net surface charge on colloids through addition of Fe III polycations. *J. Soil Sci.* 33, 451-465.

Snyder, V.A., Vázquez, M.A., Martínez, G., Ramírez, L., Hadas, A., 1995. Controlled displacement technique for measuring soil friability. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59, 44-52.

Tabachnick, B.G., Fidell, L.S., 2007. Using Multivariate Statistics. Fifth edition. Pearson, 980 p.

Utomo, W.H., Dexter, A.R., 1981. Soil friability. *J. Soil Sci.* 32, 203-213.

Watts, C.W., and Dexter, A.R., 1998. Soil friability: theory, measurement and the effects of management and organic carbon content. *Eur. J. Soil Sci.* 49, 73–84.



# 1. Conclusiones y recomendaciones

Las siguientes son las conclusiones y recomendaciones más relevantes de esta investigación:

Con la utilización del coeficiente de variación multivariante ( $CV_m$ ) se consiguió un valor más conveniente del índice de friabilidad (IF) dentro del intervalo de confianza de la resistencia al rompimiento (RR) obtenido a partir del coeficiente de variación univariante ( $CV_u$ ). Esta aseveración se asocia análogamente a la ganancia de precisión en las estimaciones de los métodos multivariantes respecto de los univariantes. Se encontró que la medida multivariante para el IF fue muy cercana al límite inferior ( $IF_i$ ) de este intervalo de confianza y no a la media del mismo ( $IF_m$ ) como frecuentemente se asume; por lo tanto, en el presente estudio el  $CV_m$  se usó como criterio para tomar el valor inferior del intervalo de confianza del  $CV_u$  ( $IF_i$ ) como el que mejor representa el valor del IF de los suelos bajo estudio. Por lo tanto, se recomienda para futuros estudios en condiciones similares a las reportadas en esta investigación considerar el límite inferior de este intervalo de confianza como la medida más representativa del IF.

Se comprobó en los suelos estudiados (Inceptisoles, Molisoles, Vertisoles, Alfisoles y Ultisoles) el mayor valor del  $IF_i$  con el mayor tamaño de los agregados seleccionados (dominantes en el suelo). Se encontró que tres tamaños de agregados fueron relevantes en la determinación del  $IF_i$  (2.0-9.49 mm, 9.50 a 19.00 mm y 19.01 -35.70 mm). Por lo tanto, se considera importante la utilización de por lo menos 3 rangos de tamaño de agregados dominantes en el suelo para la evaluación confiable de la friabilidad.

La separación de los dos horizontes morfogenéticos superficiales mostró tener efecto en los valores del  $IF_i$  de los suelos estudiados. La friabilidad del suelo determinada dentro de los límites del horizonte Ap fue superior a la encontrada en el horizonte A1, sin embargo, el comportamiento del  $IF_i$  en los dos horizontes fue similar con respecto a la variación del tamaño de agregado, lo cual se demostró con pruebas estadísticas que indicaron paralelismo en el análisis de perfiles, pero no horizontalidad ni coincidencia de los mismos. Lo anterior sugiere la necesidad de considerar los límites de los horizontes al realizar el muestreo de suelos para la evaluación de la friabilidad.

No se encontró efecto con nivel de significancia de los dominios de minerales arcillosos tipo 1:1 (caolinitas) y 2:1 (esmectitas y vermiculitas) en el  $IF_i$  de los suelos estudiados; sin embargo, se observó de manera descriptiva que en los tres tamaños de agregados estudiados la friabilidad de los suelos con dominio de arcillas 1:1 fue mayor que la presentada por los de dominio 2:1 y esta diferencia fue más evidente en los agregados de mayor tamaño. Aunque estadísticamente no se logró comprobar el efecto del tipo de arcilla en agregados naturales de suelo, la tendencia observada en el análisis descriptivo parece estar asociada al menor grado de estabilización de la MO por parte de las arcillas tipo caolinita. Se sugiere con esto que los suelos con dominio de caolinitas, por su tendencia a presentar mayor friabilidad, pueden

requerir menor consumo de energía en las operaciones de labranza y exhibir una mejor calidad estructural.

No se encontró efecto significativo desde el punto de vista estadístico de las fracciones arcilla y limo total (FaT y FLT) sobre el  $IF_i$  de los suelos; por el contrario, la fracción arena total (FAT) presentó diferencias altamente significativas, comprobándose que en estos suelos los mayores valores de arena total se correspondieron con los valores más bajos del  $IF_i$ . Se concluye por lo tanto que la fracción gruesa ejerce una influencia más clara en el comportamiento de la friabilidad en relación con la fracción fina de los suelos estudiados.

Aunque no se demostró una relación clara del  $IF_i$  con la clase textural, en la capa arable de los suelos estudiados se evidenció que aquellos con texturas franco arcillo limosas y arcillo limosas se asociaron con una mejor condición de friabilidad, lo cual se evidenció por los menores valores del  $IF_i$  en los agregados pequeños (mayor resistencia) y los mayores valores del  $IF_i$  en los agregados grandes (menor resistencia). Los suelos con estas clases texturales pueden requerir menor consumo de energía en las operaciones de labranza y son menos susceptibles a la degradación. Por otra parte, los suelos de textura franco limosa presentaron menor condición de friabilidad ya que tanto los agregados pequeños como los grandes mostraron valores altos del  $IF_i$ , por lo que su estructura exhibe mayor susceptibilidad a la degradación, aunque sean sometidos a operaciones de labranza de escasa intensidad.

Se comprobó la existencia de asociación lineal entre el carbono orgánico (CO) y el  $IF_i$  de los suelos estudiados. Los tres tamaños de agregados fueron más friables en la medida que los contenidos de CO fueron mayores; no obstante, probablemente la asociación no se manifestó más claramente debido al bajo rango de variación del CO de los suelos (rango dominante sin valores extremos: 9 – 28 g Kg<sup>-1</sup>). El horizonte Ap presentó los mayores valores del  $IF_i$  en cada tamaño de agregado en relación con el horizonte A1, posiblemente asociados a sus mayores contenidos de CO.

Se encontró que suelos con diferente taxonomía a nivel de orden que se han dedicado durante más de 20 años al cultivo de caña de azúcar, bajo prácticas convencionales de manejo mecanizado, presentaron diferencias en la friabilidad de la capa arable. Los Alfisoles y Vertisoles mostraron una mejor condición de friabilidad con respecto a los Ultisoles e Inceptisoles, debido a que los dos primeros exhibieron menores valores del  $IF_i$  en los agregados pequeños y mayores valores en los agregados más grandes, lo que facilita la fragmentación de grandes terrones o unidades estructurales en pequeños agregados óptimos para la siembra y resistentes a la degradación.

Se encontró efecto altamente significativo de la porosidad total (Pt) y del estado de agregación (Ea) en el  $IF_i$  de los suelos. Los valores del  $IF_i$  se incrementaron a mayor Pt, especialmente cuando esta última presentó valores por encima del 45%; de la misma forma, la friabilidad se incrementó en la medida que los suelos presentaron un mayor Ea, excepto cuando este estuvo por debajo del 25%. Por consiguiente y considerando el gran volumen de agregados trabajados, en principio se podría pensar en la posibilidad de utilizar la Pt y el Ea como una referencia indirecta de la friabilidad de los suelos, pero se requiere más investigación para validar estos resultados, especialmente en suelos con valores bajos de Pt y Ea, empleando adicionalmente otras medidas de la porosidad del suelo.

El efecto de la densidad aparente y el diámetro ponderado medio de los agregados en el  $IF_i$  de los suelos no resultó significativo desde el punto de vista estadístico; sin embargo, descriptivamente se encontró que en el horizonte Ap se presentó un incremento del  $IF_i$  en la medida que los suelos presentaron un mayor diámetro ponderado medio (suelos más estables), comportamiento que no se evidenció en el horizonte A1. Tampoco se encontró efecto significativo del pH y la conductividad eléctrica en el  $IF_i$ , pero se observó un comportamiento inverso de estas variables químicas en relación con la estabilidad de los suelos. Probablemente los bajos rangos de variación de estas propiedades físicas y químicas en los suelos estudiados no permitieron establecer una relación más clara con la friabilidad, por lo que se sugiere realizar nuevas investigaciones que involucren rangos más amplios de estas variables.

Los suelos con desarrollo de microestructura en bloques subangulares y espacio poroso entre el 40 y 50% presentaron los valores más altos del  $IF_i$ , mientras que por el contrario aquellos que no exhibieron desarrollo de microestructura (masiva) y su espacio poroso fue más reducido (menor del 20%) registraron los valores más bajos. Esto sugiere una relación positiva entre la friabilidad y el desarrollo de microestructura en el suelo; sin embargo, se requiere realizar un mayor número de secciones delgadas en otras tipologías de suelos que permitan confirmar esta relación.

Con el modelo estadístico/matemático utilizado, la máxima friabilidad de los suelos estudiados se estimó en un contenido de agua de  $332.04 \text{ g kg}^{-1}$  en el horizonte Ap y de  $279.89 \text{ g kg}^{-1}$  en el horizonte A1 respectivamente. Estos contenidos de agua se lograron a potenciales de presión de  $-78.62 \text{ kPa}$  en el horizonte Ap y de  $-30.08 \text{ kPa}$  en el horizonte A1. De acuerdo con esto, se confirma en 5 tipos de suelos del trópico cultivados en caña, que la máxima (óptima) friabilidad tiene una tendencia fuerte a lograrse a contenidos de agua obtenidos en el rango de potenciales de presión entre  $-30$  y  $-100 \text{ kPa}$ .

En agregados sometidos a diferentes contenidos de agua, la máxima (óptima) friabilidad se alcanzó en un contenido de agua cercano al límite plástico (LP):  $0.88*ALP$  para el horizonte Ap y  $0.91*ALP$  para el horizonte A1; resultados que concuerdan con otros obtenidos en suelos de otras latitudes. Por lo tanto, la posibilidad de predecir el contenido de agua para la máxima (óptima) friabilidad a partir del LP se convierte en una alternativa de gran relevancia en el manejo físico-mecánico de los suelos.

La presente investigación es la primera que se realiza sobre este tópico de forma cuantitativa en el país, en ella se utilizó un gran volumen de muestras de suelo, lo que le confiere gran confiabilidad y relevancia a los resultados obtenidos. Esta investigación proporciona a los científicos información clave sobre la relación de la friabilidad con otras propiedades físicas, químicas y mineralógicas de los suelos, que da luces sobre la posibilidad de acercarse a la determinación indirecta de la friabilidad a través de propiedades de más fácil determinación en el suelo y de menor costo. Igualmente, los resultados obtenidos brindan valiosa información a profesionales, técnicos y agricultores a cerca del estado real de la friabilidad de sus suelos y les permite aproximarse al conocimiento del momento adecuado para las operaciones de labranza, con bajas demandas de energía y conservando la calidad de los suelos.

Se recomienda continuar con investigaciones sobre esta temática en Colombia encaminadas a evaluar la utilización de métodos cualitativos, semicuantitativos y cuantitativos de manera conjunta en otros cultivos y en otros tipos de suelos, paralelamente con el mejoramiento de los métodos actuales de determinación y la validación de nuevas técnicas que permitan

establecer la friabilidad de los suelos con menor complejidad en el procedimiento y a menor costo que las actualmente utilizadas, pero de manera confiable. Así mismo, se requieren mecanismos que permitan el monitoreo de la friabilidad de la capa arable de los suelos y seguir estudiando aspectos de la temática como la relación entre contenido de agua en el que los suelos alcanzan su máxima (óptima) friabilidad, la respuesta de la friabilidad a diferentes sistemas de manejo del suelo y el manejo de la friabilidad para la reducción de los problemas de erosión y compactación de los suelos.

Finalmente, es necesario recalcar que los resultados acá presentados apuntan a mejorar la sostenibilidad de la producción agrícola a partir del conocimiento de la friabilidad del suelo, de manera que se reduzca: el gasto de energía y el consumo de combustible en la labranza; las emisiones de gases efecto invernadero durante esa operación; los costos asociados a la labranza y, el riesgo de daño en la calidad del suelo.

## **Anexos:**

### **Anexo A.**

#### **Síntesis del manejo mecanizado de las fincas donde se realizó el muestreo de suelos**

Los aspectos considerados para la selección de las fincas donde se realizó el muestreo de suelos fueron: i) coincidencia en la planta cultivada, ii) dominio de arcillas tipo 1:1 y 2:1 en los horizontes superficiales y iii) similaridad en el manejo y mecanización de los suelos. En relación con este último aspecto, a continuación se describen, de manera general, las actividades que comúnmente se realizan en las 18 fincas en las que se realizó el muestreo de suelos:

#### **Preparación del suelo para la siembra**

Las fincas seleccionadas en general superan los 20 años cultivadas en caña de azúcar. La preparación inicial del suelo al momento de iniciar el cultivo comprende un primer arado con el propósito de destruir e incorporar las malezas y los residuos de cosechas anteriores; cuando los lotes son nuevos, generalmente estos residuos son de pastos o cultivos transitorios, y cuando son de un cultivo de caña, corresponden a trozos de cepas y residuos vegetales de la cosecha. En este primer arado la profundidad de afectación del suelo es de aproximadamente 30 cm y generalmente se utilizan en esta labor rastro-arados con diámetro de discos entre 28 y 32 pulgadas.

Posteriormente se realizan labores de rastrillada utilizando discos de menor tamaño (24 a 26 pulgadas), con el propósito de romper los terrones grandes que deja el arado y generar agregados más pequeños que faciliten la siembra y proporcionen condiciones de buena aireación y retención de agua para el desarrollo inicial del cultivo. En estas fincas se realizan en general de 2 a 3 pases con rastrillo y la profundidad de afectación del suelo es de aproximadamente 15 a 20 cm. En algunos predios, luego de la rastrillada se realiza un proceso de nivelación que permite eliminar las irregularidades de la topografía del terreno y facilita las posteriores actividades de riego y drenaje de la plantación.

En algunas fincas se realiza ocasionalmente un subsolado que tiene como propósito romper capas o estratos que han alcanzado algún grado de compactación (localizados en el subsuelo) y que en muchas ocasiones han sido provocados por el mismo arado. Esta actividad alcanza una profundidad en el suelo que varía entre los 40 y 60 cm aproximadamente.

Finalmente, se realiza el surcado del suelo utilizando surcadores provistos de vertederas. Los surcos generalmente se encuentran a una distancia entre 1.40 y 1.50 m y su altura oscila entre los 20 y 35 cm.

Las anteriores labores se realizan generalmente con tractores enllantados cuya potencia puede oscilar entre 120 y 475 HP.

### **Siembra**

La siembra en estas fincas se realiza de manera manual, para ello se utilizan los esquejes o trozos de tallo de aproximadamente 60 cm de longitud (generalmente con 2 a 3 entrenudos), los cuales son localizados en la parte superior de los surcos a aproximadamente 5 cm de profundidad. Esta labor viene generalmente precedida por una actividad manual de abonamiento inicial en el lugar donde se colocarán los esquejes y un riego suave (primer riego) posterior a la localización de los mismos.

El ciclo de desarrollo del cultivo es de aproximadamente 12 meses hasta la cosecha, periodo durante el cual, en las fincas referidas no se realiza mecanización del suelo. Durante este espacio de tiempo se lleva a cabo un control manual de malezas (con herbicidas atrazina, gesapax, ametrina y amina 720 dependiendo del tipo de malezas que predomine); este control de malezas se hace cuando han salido los macollos, aproximadamente a los 2 o 3 meses de haber germinado la caña. Así mismo, se hace la resiembra, se fertiliza y se aplica riego complementario, que en general se efectúa en la zona por gravedad y cuya programación depende del estado de desarrollo de la planta, el tipo de suelo y las condiciones ambientales de la zona.

### **Cosecha**

La cosecha del cultivo se realiza de forma mecanizada; antes de esta labor se somete el cultivo a quema controlada para reducir el volumen de hojas, actividad que se complementa posteriormente con corte manual para retirar las partes de las hojas no eliminadas durante la quema. La máquina cosechadora arranca los tallos y deja en el terreno las cepas, material a partir del cual se inicia un nuevo ciclo de cultivo cuya actividad complementaria comprende un reafirmamiento de los surcos de forma manual. Posteriormente, en el lapso de los siguientes tres meses se realiza un abonamiento manual y una eliminación de malezas, todo ello ejecutado también de forma manual. La próxima actividad de mecanización del suelo se lleva a cabo durante la nueva cosecha aproximadamente a los siguientes 12 meses.

En las fincas muestreadas cada ciclo de cultivo oscila entre los 8 y 10 años, luego de lo cual se realiza una nueva siembra que implica la realización de las actividades de mecanización que involucran iniciar el ciclo desde una nueva siembra.

Una parte de los residuos de cosecha del cultivo son incorporados al suelo y otra se dispone sobre la superficie entre los surcos de siembra mediante el empleo, en algunos casos, de hileradoras con aspas, y en otros, de forma manual empleando ganchos metálicos de tres dientes. En esta actividad generalmente se utilizan tractores livianos (70 a 80 HP).

## Anexo B

### Precipitación, temperatura y altitud de las fincas donde se realizó el muestreo de suelos

**Tabla 1-B:** Precipitación mensual y anual (mm) de las fincas donde se realizó el muestreo.

Estación	Finca	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Jamundí	F-1	104,7	115,8	149,4	214,6	139,1	85,3	59,2	50,0	106,3	176,9	189,0	152,1	1542
Bocas de Palo	F-2 F-8	98,3	106,2	131,3	169,9	138,7	89,4	54,5	45,8	75,6	149,6	142,3	119,8	1321
Rozo	F-3 F-10	33,9	47,6	57,1	117,2	94,5	60,4	27,5	37,9	30,5	110,6	75,3	80,7	773
Guacarí	F-4 F-11 F-12	44,2	57,0	97,7	117,6	97,4	56,3	39,4	41,4	65,0	112,0	105,2	63,1	896
El Naranjo	F-5	117,6	103,6	177,8	212,2	142,6	93,7	55,0	45,4	82,2	148,0	182,3	104,4	1465
Santander de Quilichao	F-6 F-7 F-18	130,2	143,3	149,7	199,0	151,0	78,5	60,4	49,4	83,6	174,0	186,3	169,6	1575
Amaima	F-9	71,8	74,3	114,0	152,0	108,7	62,5	29,1	37,5	69,5	125,8	131,5	92,5	1069
Buga	F-13	78,7	81,9	123,2	136,1	135,5	46,3	62,9	73,3	77,0	171,5	130,1	112,2	1229
Ginebra	F-14	69,8	57,1	87,0	136,5	109,3	65,3	38,8	38,7	51,2	107,9	107,8	80,3	950
Tuluá	F-15	90,5	82,9	128,7	146,9	118,8	63,3	50,2	51,2	85,7	130,2	129,6	92,7	1171
Río Frío	F-16	64,5	67,1	109,3	150,0	152,2	83,8	79,9	71,1	88,4	144,1	135,9	115,5	1262
Arroyo Hondo	F-17	58,3	54,3	79,0	138,1	106,6	63,8	38,1	38,9	52,5	92,1	96,3	84,3	902

**Tabla 2-B:** Temperatura mensual y anual (°C) de las fincas donde se realizó el muestreo.

Estación	Finca	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Jamundí	F-1	22,80	23,10	23,00	22,80	22,90	22,80	22,90	23,10	22,80	22,50	22,40	22,40	22,79
Bocas de Palo	F-2 F-8	23,20	23,40	23,30	23,30	23,20	23,00	23,10	23,30	23,20	22,80	22,70	22,90	23,12
Rozo	F-3 F-10	23,80	23,60	23,60	23,40	23,40	23,60	23,60	23,60	23,70	23,00	23,10	23,20	23,47
Guacarí	F-4 F-11 F-12	23,40	23,50	23,50	23,30	23,30	23,30	23,50	23,60	23,40	22,90	22,80	23,00	23,29
El Naranjo	F-5	23,00	23,20	23,10	22,90	22,90	22,80	23,10	23,30	23,10	22,70	22,40	22,70	22,93
Santander de Quilichao	F-6 F-7 F-18	22,80	22,90	22,80	22,60	22,60	22,50	22,70	23,00	22,80	22,50	22,30	22,30	22,65
Amaima	F-9	22,70	22,80	22,80	22,70	22,70	22,60	23,00	23,20	22,90	22,40	22,20	22,40	22,70
Buga	F-13	23,60	23,50	23,70	23,50	23,30	23,60	23,70	23,60	23,40	22,60	23,00	23,20	23,39
Ginebra	F-14	23,10	23,10	23,00	23,00	23,00	23,10	23,20	23,50	23,00	22,60	22,50	22,60	22,98
Tuluá	F-15	23,10	23,20	23,10	23,00	23,00	22,90	23,20	23,20	23,10	22,60	22,50	22,70	22,97
Río Frío	F-16	23,30	23,50	23,40	23,20	23,20	23,30	23,30	23,40	23,40	22,60	22,70	22,80	23,18
Arroyo Hondo	F-17	23,60	23,70	23,60	23,30	23,30	23,40	23,60	23,70	23,60	22,90	22,80	23,00	23,38

**Tabla 3-B:** Altitud de las fincas donde se realizó el muestreo.

<b>Finca No</b>	<b>Altitud (m)</b>
F-1	963
F-2	956
F-3	987
F-4	942
F-5	994
F-6	983
F-7	1011
F-8	964
F-9	1007
F-10	952
F-11	1008
F-12	947
F-13	945
F-14	987
F-15	952
F-16	927
F-17	951
F-18	986

## Anexo C

### Información complementaria análisis estadístico artículo 2

**Efecto del tamaño de los agregados y la diferenciación de horizontes superficiales en el índice de friabilidad de suelos cultivados en caña de azúcar: Un enfoque multivariante**

#### Algoritmo de paralelismo, horizontalidad y coincidencia de horizontes

DATA FRIABILIDAD;

INPUT IF<sub>i</sub>2.0-4.79mm      IF<sub>i</sub>4.80-9.49mm      IF<sub>i</sub>9.50-19.00mm      IF<sub>i</sub>19.01-  
35.70mm      horizonte \$ @@;

DATALINES;

0.435537935	0.248224468	0.584000727	0.611834671	Ap
0.256794776	0.278100837	0.578471355	0.447786345	A1
0.384649107	0.371660381	0.646371873	0.69891284	Ap
0.164802436	0.367866642	0.341962767	0.473671333	A1
0.237485805	0.331388411	0.523772762	0.579446809	Ap
0.387842281	0.315325373	0.250662981	0.456656395	A1
0.27104701	0.318213229	0.32725754	0.404752454	Ap
0.367261153	0.228435217	0.558973911	0.659833637	A1
0.470339189	0.365368652	0.560246268	0.688593854	Ap
0.260673902	0.218424866	0.612743797	0.399033503	A1
0.318414802	0.180453736	0.364107583	0.752566937	Ap
0.239866209	0.348901943	0.424056324	0.457224131	A1
0.488434703	0.395166454	0.265615484	0.46425378	Ap
0.302706364	0.254175309	0.313824186	0.376604417	A1
0.412128221	0.456736329	0.297701085	0.654480788	Ap
0.283809052	0.229051399	0.420223513	0.697282784	A1
0.26747128	0.411004483	0.34833991	0.60045277	Ap
0.24006751	0.271197008	0.498880622	0.32429796	A1
0.39987665	0.229450801	0.380656097	0.385797728	Ap
0.500567896	0.333719484	0.421349963	0.266347861	A1
0.376918968	0.376144035	0.379787077	0.489112114	Ap
0.289898247	0.404324095	0.216497478	0.542460376	A1
0.501498265	0.323341934	0.427540632	0.233769765	Ap
0.315332606	0.296589399	0.250786199	0.243948562	A1
0.726160359	0.35247444	0.379037807	0.527898665	Ap
0.332409423	0.307910811	0.310754493	0.441090306	A1
0.618561111	0.313794115	0.268965807	0.631057204	Ap
0.316692732	0.311578446	0.355863785	0.3232954	A1
0.329542622	0.238733616	0.252581031	0.295081717	Ap
0.441811909	0.269273459	0.376822329	0.448111999	A1
0.495427167	0.378941349	0.20649036	0.759182298	Ap
0.358068658	0.317002363	0.421953339	0.320996483	A1
0.264202481	0.415712353	0.371649433	0.364710077	Ap
0.394423982	0.328461111	0.362982004	0.275457065	A1
0.304030041	0.260979661	0.33485635	0.471973324	Ap
0.362939274	0.535502905	0.328462305	0.420229324	A1

0.34249014	0.341377802	0.377286797	0.282933754	Ap
0.256529229	0.294240086	0.372079926	0.330653139	A1
0.450557733	0.303440927	0.417923065	0.539800857	Ap
0.192873312	0.430717776	0.283501036	0.358241945	A1
0.517398588	0.301150791	0.621670887	0.366162586	Ap
0.25346005	0.313980958	0.543423969	0.476530904	A1
0.447176419	0.584915841	0.569035435	0.340180286	Ap
0.407575388	0.342007805	0.309701181	0.304473876	A1
0.408591596	0.37012208	0.713234721	0.395520621	Ap
0.448174593	0.327953879	0.391295358	0.396522119	A1
0.449856011	0.427083465	0.320387663	0.296625449	Ap
0.458894739	0.38244858	0.372870925	0.662255094	A1
0.623300937	0.794545988	0.53276993	0.477794463	Ap
0.433758584	0.309905468	0.594619405	0.295444211	A1
0.385919865	0.360301309	0.46183051	0.638858179	Ap
0.422243401	0.28145411	0.239933735	0.377138079	A1
0.334025215	0.325970474	0.374402853	0.461700036	Ap
0.310271569	0.209530787	0.223672947	0.312357381	A1
0.44306432	0.471903822	0.354806626	0.280362062	Ap
0.341294182	0.213857766	0.220927149	0.466486225	A1
0.179945155	0.212479507	0.247963657	0.329793686	Ap
0.234662934	0.316189072	0.495444779	0.488747571	A1
0.313546003	0.235961288	0.379139893	0.296501252	Ap
0.32224469	0.159063765	0.262921359	0.270844866	A1
0.341330304	0.398698028	0.229579199	0.47896899	Ap
0.376001823	0.471106302	0.253697175	0.390822199	A1
0.361904157	0.342418748	0.396511043	0.326440438	Ap
0.303897132	0.287017067	0.303047854	0.308020753	A1
0.276148359	0.411368137	0.302260153	0.47495004	Ap
0.233674594	0.307219032	0.414115728	0.379223916	A1
0.45405758	0.380181567	0.499431028	0.364147311	Ap
0.396648739	0.295825438	0.269925968	0.098994668	A1
0.328725657	0.279639683	0.321652453	0.471168082	Ap
0.460309242	0.109708071	0.196349262	0.302916693	A1
0.287106178	0.255033208	0.255468429	0.500847374	Ap
0.315793049	0.346893713	0.208141459	0.583126658	A1
0.275746979	0.619024256	0.391614008	0.439086096	Ap
0.235534289	0.300342678	0.157796752	0.348772982	A1
0.277886282	0.40440427	0.30312061	0.632673419	Ap
0.241216653	0.226324266	0.256719037	0.374776018	A1
0.355542059	0.522170656	0.584994572	0.51035585	Ap
0.302430781	0.240372579	0.299915473	0.466210397	A1
0.506316099	0.388200672	0.563017684	0.495537592	Ap
0.281455836	0.290649729	0.326395669	0.468893708	A1
0.575075331	0.50554566	0.479873672	0.696787151	Ap
0.369189081	0.27283653	0.392693008	0.351476362	A1
0.386544705	0.284085649	0.528594404	0.416112631	Ap
0.270034203	0.24412795	0.293891841	0.473161093	A1

0.268029421	0.387988738	0.389457809	0.426200225	Ap
0.469211774	0.287735672	0.47090807	0.315228385	A1
0.378657301	0.568162394	0.468512293	0.494009658	Ap
0.332152993	0.324761151	0.389720432	0.621085972	A1
0.333225826	0.395642103	0.408951632	0.641490427	Ap
0.502076724	0.305121508	0.263584114	0.396823625	A1
0.441054676	0.25155127	0.251987175	0.288401426	Ap
0.178517443	0.242646662	0.280903937	0.391527322	A1
0.504515579	0.301756066	0.342984925	0.571450231	Ap
0.3162821	0.264280444	0.373347383	0.250994701	A1
0.429839011	0.330681627	0.508747857	0.506330912	Ap
0.479042061	0.430131978	0.226327754	0.389969779	A1
0.351786167	0.571961829	0.522185054	0.560624432	Ap
0.247191068	0.252731726	0.273523342	0.453492235	A1
0.665085627	0.169821741	0.477858649	0.620513118	Ap
0.384035425	0.467574691	0.409349697	0.283573623	A1
0.518373208	0.531658898	0.443929915	0.704691132	Ap
0.291506165	0.555011235	0.631516013	0.693723647	A1
0.348975502	0.37700525	0.3198466	0.362195179	Ap
0.177544623	0.190669269	0.308760322	0.412443261	A1
0.234220439	0.365628126	0.326631528	0.50401159	Ap
0.340355763	0.422625217	0.404019142	0.370689787	A1
0.381444036	0.474438834	0.365451819	0.430830548	Ap
0.559851882	0.394463081	0.338191206	0.383623745	A1
0.443001598	0.561069642	0.430284563	0.441908068	Ap
0.293038323	0.311234203	0.592604415	0.274184742	A1
0.225926461	0.321198403	0.445509432	0.700277235	Ap
0.202981856	0.239726471	0.472644935	0.484573284	A1
0.447036201	0.347495679	0.411125017	0.394869226	Ap
0.31821144	0.358001134	0.28701684	0.247533531	A1
0.232196038	0.172777291	0.318415708	0.48526262	Ap
0.400595719	0.206933082	0.39705461	0.436748645	A1
0.612175308	0.463799571	0.396337552	0.470319319	Ap
0.270349172	0.329049731	0.314903623	0.263296652	A1
0.372986059	0.316386488	0.331000912	0.212302924	Ap
0.213928303	0.337251767	0.343508693	0.301276378	A1
0.447447163	0.451058541	0.484215776	0.56857803	Ap
0.269041451	0.443948345	0.271046804	0.307683648	A1
0.401586256	0.427650916	0.521556376	0.420397599	Ap
0.400486024	0.372206129	0.519743609	0.469724994	A1
0.20161747	0.368533214	0.55667729	0.459012419	Ap
0.163670114	0.342234368	0.254112351	0.409514875	A1
0.10362687	0.304000846	0.586672781	0.406650136	Ap
0.145848125	0.384771555	0.304148674	0.517572658	A1
0.349182642	0.498828655	0.400740264	0.526817477	Ap
0.246384491	0.34157932	0.528285923	0.755421728	A1
0.194413306	0.430741854	0.38066437	0.380421331	Ap
0.255753496	0.235480858	0.495703917	0.324345811	A1
0.188374653	0.204711885	0.22543363	0.17727332	Ap

0.319018493	0.285819041	0.397599043	0.391642901	A1
0.229314263	0.246866767	0.410215671	0.433584741	Ap
0.181580568	0.21071656	0.310194519	0.214444193	A1
0.3701716	0.391721947	0.314767197	0.377730569	Ap
0.314591119	0.303317148	0.358721675	0.22680938	A1
0.293186959	0.334877038	0.410211697	0.289824802	Ap
0.209678811	0.294703985	0.5862559	0.277337008	A1
0.211093322	0.382462863	0.424169617	0.281632834	Ap
0.252357765	0.188570822	0.364386769	0.526301126	A1
0.309239726	0.303375788	0.223906878	0.222210781	Ap
0.147919916	0.249332506	0.229047869	0.378847026	A1
0.264705003	0.187340642	0.285379573	0.276433478	Ap
0.222612255	0.206919528	0.265097051	0.48026837	A1
0.220698263	0.274952969	0.364695851	0.394429772	Ap
0.218784471	0.160491877	0.264393239	0.313309442	A1
0.209369485	0.078645031	0.185482401	0.309726553	Ap
0.245200983	0.277976209	0.286020569	0.259455959	A1
0.176037773	0.20987866	0.228907944	0.214047109	Ap
0.219917302	0.393773154	0.332408845	0.31117086	A1
0.18666147	0.346825928	0.342540885	0.349155582	Ap
0.173395694	0.156832654	0.370610136	0.420299832	A1
0.190402898	0.251349819	0.362645034	0.413345487	Ap
0.178354196	0.165014939	0.341230568	0.364277832	A1
0.170693049	0.258998373	0.27096932	0.324472579	Ap
0.20074228	0.180814603	0.122669245	0.376851359	A1
0.158185682	0.303170388	0.282783073	0.390166612	Ap
0.190634019	0.173429084	0.250044647	0.288066615	A1
0.247405041	0.254564483	0.275384399	0.297404089	Ap
0.142607538	0.292642069	0.323828091	0.265130044	A1
0.378680492	0.16541996	0.493277509	0.229906054	Ap
0.321346196	0.461747498	0.340480517	0.253168554	A1
0.222872078	0.265728425	0.312163686	0.460930576	Ap
0.318874339	0.195233257	0.232374131	0.387180196	A1
0.392534339	0.301595398	0.342360843	0.3883989	Ap
0.429396042	0.511755517	0.347876918	0.615945895	A1
0.30810265	0.446794476	0.394802007	0.301304935	Ap
0.181330957	0.190861943	0.286818161	0.344168825	A1
0.252020679	0.355622317	0.519857186	0.302983462	Ap
0.303834558	0.410565873	0.418577109	0.372627087	A1
0.259366474	0.252193681	0.30667971	0.353714713	Ap
0.189447711	0.168834799	0.33744891	0.206232353	A1
0.305753602	0.288961111	0.31410594	0.226633227	Ap
0.203655575	0.315760223	0.290124137	0.275789593	A1
0.224016717	0.424959108	0.485757231	0.229065992	Ap
0.223428905	0.356164508	0.28178605	0.39161573	A1
0.183863785	0.403017073	0.284529432	0.42573854	Ap
0.285329328	0.138964729	0.227748598	0.231076858	A1
0.412777681	0.273174978	0.264430762	0.512681833	Ap

```

0.247436826 0.353321365 0.358166197 0.275861684 A1;
*proc print;
*run;
title2 'Comparación de horizontes: Análisis de Perfiles';
*proc glm data = FRIABILIDAD ;
*class horizonte;
*model IFi2.0-4.79mm IFi4.80-9.49mm      IFi9.50-19.00mm      IFi19.01-35.70mm
=horizonte/nouni;/*modelo multivariante*/
*contrast "'paralelismo?'" horizonte 1 -1;
*contrast "'horizontalidad?'" intercept 1;
*manova h=horizonte m= (1 -1 0 0 , 1 0 -1 0, 1 0 0 -1)/printe printh;
*contrast "'coincidencia?'" horizonte 1 -1;
*manova h=horizonte m=(1 1 1 1) /printe printh;
*run;
proc glm data = FRIABILIDAD ;/*sección para probar equivalencia de los dos primeros
agregados*/
class horizonte;
model IF1i IF2i =horizonte/nouni;/*agrupación de los dos tamaños inferiores*/
contrast "'paralelismo?'" horizonte 1 -1;
contrast "'horizontalidad?'" intercept 1;
manova h=horizonte m= (1 -1 )/printe printh;
contrast "'coincidencia?'" horizonte 1 -1;
manova h=horizonte m=(1 1 ) /printe printh;
run;

```

### Algoritmo SAS para el índice de friabilidad multivariante

```

proc iml;
RRAp =
{86.65   48.782   64.249   28.880,   79.65   79.349   57.443   43.025,
134.91   80.015   27.328   35.700,  120.51  94.072   76.817   23.190,
 86.48   64.905   41.135   33.544,  112.82  80.703   76.240   19.244,
 87.95  121.463   69.304   21.714,   57.74   51.251   42.470   17.320,
 96.96   91.913   62.322   18.276,   89.59   41.372   51.963   14.195,
 96.13   63.902   63.564   25.509,   81.07   68.469   48.122   17.420,
 48.01   45.489   29.909   24.131,   44.43   53.568   33.989   21.691,
 74.81   74.922   46.681   29.109,   49.34   60.778   42.659   22.327,
106.68  125.826   53.340   26.283,   82.54  117.392   49.712   37.313,
 47.50   67.575   31.604   18.285,   93.50   85.237   36.858   26.936,
 91.55  105.762   39.810   21.224,   49.81   46.839   22.043   11.938,
 88.10   68.698   30.912   24.383,   71.92   37.862   18.708   19.159,
 41.13   25.053   17.883   11.940,   57.52   34.375   24.164   17.862,
 25.52   45.248   20.142   12.001,   95.07  122.045   46.902   29.085,
108.531  45.717  107.778   43.942,   64.65   64.318   27.600   23.621,
 72.08   41.545   61.893   24.108,   92.36   60.754   76.536   38.568,
100.65   61.497   80.454   43.267,   72.54   96.413   60.849   23.751,
 88.65   67.036   54.082   23.224,  104.71  126.408   76.918   33.915,
 80.51   65.880   83.506   22.521,   98.66   87.697   74.148   40.912,
103.80   56.855   34.282   24.031,   59.73   61.044   64.472   40.947,
 74.52   71.153   57.496   54.341,   63.98   71.458   25.829   25.574,
 63.78   79.548   53.648   25.374,   37.41   42.635   30.871   12.831,

```

75.93	74.151	56.996	33.632,	55.64	87.671	39.868	22.334,
26.96	30.364	28.238	23.424,	25.38	34.279	18.048	21.678,
53.10	27.424	22.791	23.621,	42.30	27.136	24.313	16.567,
18.46	14.272	10.464	11.850,	92.01	106.570	103.268	38.957,
88.23	108.838	97.313	51.166,	73.54	79.411	46.626	28.909,
73.36	67.537	78.179	27.491,	117.65	126.117	131.992	51.093,
75.52	76.801	43.998	35.436,	97.95	106.645	94.125	25.613,
37.59	43.701	38.661	19.805,	92.22	93.630	60.286	42.571,
98.85	121.599	118.268	46.611,	136.41	122.061	29.995	30.824,
122.57	141.932	91.499	20.427,	124.66	174.953	71.397	28.240,
100.91	130.172	28.742	19.100,	122.66	69.719	74.359	25.341,
116.72	105.329	63.650	31.996,	124.36	104.108	68.348	32.381,
63.21	56.937	45.913	27.801,	39.44	53.895	29.462	19.915,
113.32	107.002	113.430	33.506,	72.79	58.716	69.886	30.875,
98.02	110.909	89.976	30.974,	112.95	101.292	81.634	36.394,
112.04	99.954	93.863	44.052,	110.62	100.983	84.804	37.099,
136.41	121.586	105.020	54.273,	113.60	96.028	116.395	43.591,
100.46	137.778	120.367	48.415,	151.68	141.314	169.524	51.618,
111.57	90.410	86.108	52.930,	52.50	34.815	22.641	15.797,
33.13	30.019	20.489	10.845,	55.34	33.668	18.600	15.037,
56.36	38.140	22.675	19.512,	33.53	19.254	23.348	12.733,
95.67	89.089	60.131	43.802,	76.02	63.533	41.101	23.372,
131.79	65.763	42.905	31.092,	76.71	60.479	46.146	28.177,
79.03	54.466	26.375	19.571};				

/\* estimaciones clásicas\*/

$n1 = \text{NROW}(\text{RRAp});$

$\text{in1} = \text{I}(n1);$

$\text{jn1} = \text{J}(n1, 1);$

$\text{jnn1} = \text{J}(n1, n1, 1);$

$\text{mean1} = (1/n1) * (\text{jn1} * \text{RRAp});$

$\text{cov1} = (1/(n1-1)) * (\text{RRAp} * (\text{in1} - (1/n1) * \text{jnn1}) * \text{RRAp});$

$\text{num1} = \text{mean1} * \text{cov1} * \text{mean1};$

$\text{den1} = (\text{mean1} * \text{mean1}) * (\text{mean1} * \text{mean1});$

$\text{fmAp} = \text{sqrt}(\text{num1}/\text{den1});$

$\text{RRA1} =$

96.75	99.873	58.753	29.969,	117.76	115.673	94.817	35.656,
113.15	144.596	111.925	40.645,	104.07	108.414	47.391	28.561,
90.73	87.343	45.216	28.947,	124.83	12.850	80.335	32.431,
112.94	103.712	67.394	31.215,	46.02	69.853	42.752	25.323,
89.10	117.275	65.743	22.027,	81.83	79.095	42.752	15.148,
89.19	72.204	61.142	23.356,	87.70	96.619	70.215	17.572,
74.84	74.374	52.423	23.155,	61.46	75.049	55.860	30.488,
49.12	65.629	42.891	22.644,	62.27	80.101	37.347	21.006,
111.18	190.205	66.314	26.263,	93.44	127.657	78.297	32.760,
64.44	56.678	43.224	21.099,	118.01	130.360	58.537	26.206,
104.54	135.597	75.857	32.958,	45.13	63.992	21.601	20.580,
70.01	37.457	29.927	15.536,	64.07	44.361	26.928	21.175,
59.73	25.630	18.201	15.849,	54.34	45.876	26.101	30.575,
40.59	66.153	42.441	27.338,	95.24	112.927	90.649	41.770,
112.89	122.919	81.320	55.621,	90.01	102.818	55.773	27.161,
85.09	50.950	65.363	25.112,	81.59	71.064	80.595	33.772,
103.18	128.907	108.641	42.844,	100.13	109.530	81.405	16.968,
76.72	64.324	74.351	20.755,	107.92	152.325	90.270	63.001,
120.22	125.000	94.362	44.389,	127.51	127.529	103.825	38.261,

```

103.43 127.912 74.629 47.882, 88.16 107.816 83.502 60.434,
99.53 140.925 151.634 52.934, 95.95 79.247 98.232 34.255,
74.94 90.001 49.028 31.742, 67.00 50.692 36.792 24.795,
81.77 100.814 94.640 43.567, 57.52 62.360 53.596 30.471,
82.76 67.810 53.338 35.361, 38.97 36.782 23.599 22.743,
106.72 92.171 50.588 45.608, 76.07 57.848 57.742 51.073,
17.15 23.463 36.027 20.412, 126.94 133.735 80.143 40.964,
103.68 103.393 90.267 52.503, 77.79 96.079 58.322 33.958,
94.89 68.995 37.750 27.221, 117.83 144.010 92.695 56.526,
93.78 98.188 90.395 40.025, 92.22 119.905 68.479 30.394,
65.78 70.517 53.031 30.229, 93.74 100.947 60.529 45.556,
109.14 113.257 93.414 54.691, 83.61 93.071 56.001 23.775,
95.05 154.414 82.862 13.269, 121.45 145.861 57.342 28.442,
115.38 84.927 56.795 27.398, 118.63 92.723 37.948 30.171,
97.18 92.892 71.488 35.680, 113.30 124.463 73.046 39.559,
86.96 79.013 74.737 44.792, 80.30 66.014 45.807 29.865,
120.11 135.886 102.017 51.782, 109.16 70.753 97.562 38.411,
112.63 127.105 116.681 43.784, 100.82 117.655 78.560 37.818,
119.73 96.087 90.833 40.932, 103.22 112.449 66.246 30.438,
132.48 98.952 67.736 34.007, 118.25 88.599 88.599 52.372,
124.16 81.582 164.224 56.632, 129.15 153.802 153.222 62.391,
126.34 71.869 120.680 47.026, 59.36 42.247 22.494 16.071,
44.16 33.959 25.795 15.784, 61.91 34.585 29.183 23.006,
81.72 70.074 42.294 25.222, 34.86 28.641 22.744 17.948,
100.34 89.925 63.853 25.018, 99.46 90.891 57.784 30.248,
110.51 82.187 41.653 31.048, 89.06 82.133 32.930 28.574,
86.69 47.381 34.108 31.552};

```

```

n2=NROW(RRA1);
in2=I(n2);
jn2=J(n2,1);
jnn2=J(n2,n2,1);
mean2=(1/n2)*(jn2`*RRA1)`;
cov2=(1/(n2-1))*(RRA1`*(in2-(1/n2)*jnn2)*RRA1);
num2=mean2`*cov2*mean2;
den2=(mean2`*mean2)*(mean2`*mean2);
fmA1=sqrt(num2/den2);/*medida multivariante de friabilidad*/
print mean1 cov1 ;
print mean2 cov2;
print fmAp;
print fmA1;

```

**Tabla 1-C:** Estadísticos de prueba para evaluar paralelismo en el análisis de perfiles.

Estadístico	Valor	F	Gl num	Gl den	Pr>F
Lambda de Wilk	0.9938	0.37	3	178	0.7767
Traza de Pillai	0.0062	0.37	3	178	0.7767
Traza de Hotelling-Lawley	0.0062	0.37	3	178	0.7767
Mayor raíz de Roy	0.0062	0.37	3	178	0.7767

**Tabla 2-C:** Estadísticos de prueba para evaluar horizontalidad en el análisis de perfiles.

Estadístico	Valor	F	Gl num	Gl den	Pr>F
Lambda de Wilk	0.8492	10.53	3	178	<0.0001
Traza de Pillai	0.1508	10.53	3	178	<0.0001
Traza de Hotelling-Lawley	0.1775	10.53	3	178	<0.0001
Mayor raíz de Roy	0.1775	10.53	3	178	<0.0001

**Tabla 3-C:** Estadísticos de prueba para evaluar coincidencia en el análisis de perfiles.

Estadístico	Valor	F	Gl num	Gl den	Pr>F
Lambda de Wilk	0.912	17.26	1	180	<0.0001
Traza de Pillai	0.087	17.26	1	180	<0.0001
Traza de Hotelling-Lawley	0.096	17.26	1	180	<0.0001
Mayor raíz de Roy	0.096	17.26	1	180	<0.0001

**Tabla 4-C:** Estadísticos de prueba para evaluar horizontalidad en el análisis de perfiles en los dos primeros tamaños de agregados (2.0 a 4.79 mm y 4.80 a 9.49 mm).

Estadístico	Valor	F	Gl num	Gl den	Pr>F
Lambda de Wilk	0.9996	0.08	1	180	0.7785
Traza de Pillai	0.0004	0.08	1	180	0.7785
Traza de Hotelling-Lawley	0.0004	0.08	1	180	0.7785
Mayor raíz de Roy	0.0004	0.08	1	180	0.7785

**Tabla 5-C:** Estadísticas descriptivas del índice de friabilidad en su límite inferior (IF<sub>i</sub>), por horizonte y rangos de tamaño de agregados.

Estadística	Horizonte Ap			Horizonte A1		
	IF <sub>i</sub> 2.0- 9.49	IF <sub>i</sub> 9.50- 19.00	IF <sub>i</sub> 19.01- 35.70	IF <sub>i</sub> 2.0- 9.49	IF <sub>i</sub> 9.50- 19.00	IF <sub>i</sub> 19.01- 35.70
Media	0.375	0.391	0.438	0.341	0.349	0.385
Desviación	0.072	0.112	0.139	0.056	0.109	0.121
Media truncada 5%	0.373	0.387	0.435	0.339	0.349	0.385
Error estándar	0.008	0.012	0.015	0.006	0.011	0.012

**Aclaración de algunas expresiones utilizadas:** IF<sub>12i</sub>: índice de friabilidad (límite inferior) del promedio de los dos primeros rangos de tamaño de agregados (2.0-9.5 mm); IF<sub>3i</sub>: índice de friabilidad (límite inferior) del tercer rango de tamaño de agregados (9.50-19.00 mm); IF<sub>4i</sub>: índice de friabilidad (límite inferior) del cuarto rango de tamaño de agregados (19.01-35.70 mm).

## Anexo D

### Información complementaria análisis estadístico artículo 3

#### Influencia de la mineralogía de arcillas, textura y contenido de carbono orgánico en el índice de friabilidad de suelos cultivados en caña de azúcar

**Tabla 1-D:** Análisis de componentes principales para dominancia mineralógica de la fracción arcilla (peso de los componentes por variables).

Minerales	Componente 1	Componente 2	Componente 3
Anfibol	0.297116	0.039561	-0.0315804
Caolinita	-0.332383	0.308613	0.227839
Clorita	0.183785	0.197792	0.602722
Cristobalita	-0.228513	-0.568774	0.206654
Esmectita	0.354441	-0.020315	-0.337104
Gibsita	-0.344178	0.267804	-0.0870987
Hidróxidos de hierro	-0.347520	0.148405	-0.103358
Interestratificados e Intergrados	-0.259364	-0.051667	-0.0698811
Micas	0.253469	0.148206	0.506046
Metahaloisita	-0.150785	-0.627385	0.183438
Cuarzo	-0.324124	0.153802	-0.1487
Vermiculita	0.30180	-0.067159	-0.304101

Anfibol (af), caolinita (ca), clorita (cl), cristobalita (cr), esmectita (em), gibsita (gb), hidróxidos de hierro (hf), interestratificados e intergrados (ii), micas (mi), metahaloisita (mt), cuarzo (qz), vermiculita (vr).

**Tabla 2-D:** Análisis de componentes principales para dominancia mineralógica de la fracción arcilla (peso de los componentes por observaciones).

Fila	Componente 1	Componente 2	Componente 3
1	3.36943	2.30474	-0.237422
2	2.64824	1.27547	-0.482666
3	2.63126	1.38698	-0.255152
4	1.8304	0.994513	-0.0853326
5	2.13225	0.646875	-0.802764
6	3.23598	1.67497	-1.07933
7	3.61507	1.50646	-1.39137
8	-2.35123	0.21725	1.31934
9	-2.14736	0.216932	0.981549
10	-2.45669	0.421891	1.21174
11	-1.96168	-0.217504	-0.79538

<b>Fila</b>	<b>Componente 1</b>	<b>Componente 2</b>	<b>Componente 3</b>
12	-1.13417	-0.181142	-0.555164
13	-0.915531	-0.0533527	-0.199986
14	-1.44229	0.156766	-0.916531
15	-1.38627	0.177533	-0.86985
16	2.13342	-4.10402	1.53726
17	1.91328	-4.50754	1.31407
18	2.20562	-3.86162	1.62861
19	3.17811	-3.27898	1.38561
20	2.13905	-4.14964	1.79847
21	1.94727	-1.85174	1.17477
22	2.04506	0.409951	0.440684
23	1.24431	0.849806	0.635724
24	1.24852	0.147986	-0.313077
25	2.97912	-3.60932	1.76544
26	2.04697	1.46761	-0.209958
27	1.2738	0.832614	-0.0248972
28	0.899288	0.930583	0.02957
29	0.756579	0.543456	-0.478474
30	-0.172483	0.457743	-0.518934
31	2.10613	1.42971	-0.0817955
32	2.41741	0.941049	-1.18692
33	3.43045	1.48474	-1.5545
34	3.23598	1.67497	-1.07933
35	-1.44721	0.298783	0.55776
36	-1.31042	1.38446	3.02927
37	-0.978835	1.52876	2.79169
38	-1.92686	2.22431	4.1875
39	-1.19517	1.24401	2.32599
40	-1.41589	1.58911	2.92167
41	-2.06358	-0.711568	-1.4363
42	-1.74444	-0.475459	-0.928697
43	-2.07396	-0.251328	-0.307005
44	-2.13658	-0.620825	-1.25546
45	-2.13658	-0.620825	-1.25546
46	-1.47312	0.118254	0.753441
47	-2.52027	-0.0963017	0.323976
48	-2.37187	0.561344	0.945007
49	-1.85959	-0.338891	-0.737529
50	-2.10934	0.598297	0.66613
51	-1.83876	-0.299932	-1.4791
52	-1.86483	-0.473085	-1.46834
53	-0.938539	-0.0533115	-0.926711
54	-1.19934	-0.192543	-0.862306
55	-1.12634	-0.283286	-1.04314

Fila	Componente 1	Componente 2	Componente 3
56	-2.0095	-0.403633	-0.42502
57	-2.0095	-0.403633	-0.42502
58	-1.8217	-0.173658	-0.308593
59	-2.0095	-0.403633	-0.42502
60	-2.0095	-0.403633	-0.42502
61	-0.774696	-0.814102	-1.62319
62	-0.716609	-0.53848	-0.797821
63	-0.0873935	-1.43286	-1.80752
64	-1.22143	-0.82183	-1.19444
65	-0.716609	-0.53848	-0.797821
66	-0.759594	-0.47267	-0.849885
67	-0.494596	-0.710269	-1.38979
68	-0.607279	-0.848254	-1.45964
69	-0.673529	-0.788854	-1.32467
70	-0.953629	-0.892687	-1.55807
71	0.129957	1.25579	1.56688
72	0.336329	0.826046	0.779165
73	0.129957	1.25579	1.56688
74	-0.638172	0.887617	1.48911
75	-0.539119	0.996799	1.24326
76	1.47134	0.252139	-0.667099
77	2.13327	1.44831	-0.0471496
78	1.78297	0.0592117	0.131175
79	1.89858	0.046787	0.15625
80	3.19623	1.15248	-0.313353

#### Algoritmo del análisis de covarianza para el diseño factorial incompleto

DATA arti2;

INPUT HZ \$ tax \$ IF<sub>i</sub> tamAgre \$ FAT FaT dom tex \$ CO @@;

DATALINES;

Ap	alf	0.3419	I	10.38	64.23	11	Ar	26.03
A1	alf	0.2674	I	8.10	59.26	11	Ar	23.09
Ap	alf	0.3782	I	4.80	49.13	11	ArL	28.23
A1	alf	0.2663	I	8.67	71.27	11	Ar	21.55
Ap	alf	0.2844	I	4.51	65.10	11	Ar	22.07
A1	alf	0.3516	I	7.11	79.04	11	Ar	19.41
Ap	alf	0.2946	I	8.53	54.07	11	Ar	24.84
A1	alf	0.2978	I	9.39	64.87	11	Ar	23.42
Ap	alf	0.4179	I	12.38	52.55	11	Ar	23.32
A1	alf	0.2395	I	11.55	51.85	11	Ar	23.11
Ap	alf	0.2494	I	7.90	47.01	11	ArL	22.02
A1	alf	0.2944	I	7.28	44.79	11	ArL	20.94
Ap	alf	0.4418	I	18.17	47.18	11	Ar	19.60
A1	alf	0.2784	I	15.51	42.29	11	ArL	15.77
Ap	alf	0.4344	I	18.84	40.47	11	ArL	19.33
A1	alf	0.2564	I	17.84	40.47	11	ArL	18.63

Ap	alf	0.3392	I	14.00	69.12	11	Ar	18.12
A1	alf	0.2556	I	9.96	51.87	11	Ar	20.84
Ap	alf	0.3147	I	18.60	74.78	11	Ar	19.78
A1	alf	0.4171	I	14.93	47.65	11	Ar	19.12
Ap	alf	0.3765	I	15.97	47.87	11	Ar	17.41
A1	alf	0.3471	I	13.57	49.12	11	Ar	18.23
Ap	mol	0.4124	I	20.21	35.41	21	FAr	20.51
A1	mol	0.3060	I	19.97	33.38	21	FArL	20.13
Ap	mol	0.5393	I	20.36	33.39	21	FAr	17.14
A1	mol	0.3202	I	21.48	31.69	21	FAr	17.64
Ap	mol	0.4662	I	34.99	25.09	21	F	14.03
A1	mol	0.3141	I	37.05	24.00	21	F	16.72
Ap	mol	0.2841	I	26.78	34.45	21	FAr	18.95
A1	mol	0.3555	I	27.61	35.04	21	FAr	16.38
Ap	mol	0.4372	I	15.35	27.85	21	FArL	22.94
A1	mol	0.3375	I	20.81	49.36	21	Ar	20.74
Ap	ver	0.3400	I	10.79	53.37	21	Ar	34.01
A1	ver	0.3614	I	2.25	62.21	21	Ar	18.72
Ap	ver	0.2825	I	10.60	56.20	21	Ar	18.63
A1	ver	0.4492	I	8.90	51.11	21	Ar	17.92
Ap	ver	0.3419	I	38.57	31.49	21	FAr	18.55
A1	ver	0.2754	I	38.87	27.64	21	FAr	13.35
Ap	ver	0.3770	I	14.64	52.95	21	Ar	23.05
A1	ver	0.3118	I	17.35	50.44	21	Ar	20.97
Ap	ver	0.4093	I	7.41	56.58	21	Ar	25.47
A1	ver	0.2837	I	5.57	58.74	21	Ar	20.46
Ap	ult	0.5160	I	15.83	55.17	11	Ar	18.91
A1	ult	0.3748	I	17.68	56.09	11	Ar	19.45
Ap	ult	0.3894	I	15.18	54.51	11	Ar	18.73
A1	ult	0.3881	I	15.66	53.86	11	Ar	18.83
Ap	ult	0.4385	I	10.43	59.85	11	Ar	19.04
A1	ult	0.4207	I	12.54	60.10	11	Ar	18.46
Ap	ult	0.7089	I	13.98	53.62	11	Ar	19.21
A1	ult	0.3718	I	9.47	62.95	11	Ar	18.53
Ap	ult	0.3731	I	13.13	59.75	11	Ar	22.68
A1	ult	0.3518	I	15.25	56.17	11	Ar	18.43
Ap	ult	0.3300	I	8.86	73.20	11	Ar	28.17
A1	ult	0.2599	I	8.26	65.26	11	Ar	30.55
Ap	ult	0.4575	I	6.15	73.06	11	Ar	19.43
A1	ult	0.2776	I	6.83	57.02	11	Ar	19.08
Ap	ult	0.1962	I	4.12	72.62	11	Ar	17.97
A1	ult	0.2754	I	4.82	73.13	11	Ar	17.13
Ap	ult	0.2748	I	15.61	49.49	11	Ar	18.58
A1	ult	0.2407	I	15.09	51.37	11	Ar	17.26
Ap	ult	0.3700	I	6.56	78.58	11	Ar	33.25
A1	ult	0.4236	I	4.25	63.48	11	Ar	30.15
Ap	alf	0.3522	I	15.29	50.02	11	Ar	15.54
A1	alf	0.2955	I	12.12	48.84	11	Ar	15.79
Ap	alf	0.3438	I	6.73	55.83	11	Ar	16.77
A1	alf	0.2704	I	4.89	55.48	11	Ar	19.30
Ap	alf	0.4171	I	7.26	50.70	11	ArL	22.00
A1	alf	0.3462	I	3.70	54.45	11	ArL	20.07
Ap	alf	0.3042	I	22.58	36.16	11	FAr	20.11

A1	alf	0.2850	I	17.04	42.41	11	ArL	18.06
Ap	alf	0.2711	I	9.10	50.45	11	ArL	22.83
A1	alf	0.3313	I	8.70	52.14	11	Ar	16.91
Ap	alf	0.4474	I	4.73	66.83	11	Ar	21.07
A1	alf	0.2679	I	5.09	67.28	11	Ar	19.39
Ap	alf	0.3411	I	2.71	73.70	11	Ar	25.66
A1	alf	0.2338	I	3.34	70.13	11	Ar	20.40
Ap	alf	0.4389	I	3.07	67.56	11	Ar	15.45
A1	alf	0.2714	I	2.52	66.74	11	Ar	15.29
Ap	alf	0.4473	I	3.56	67.57	11	Ar	17.75
A1	alf	0.2861	I	4.05	83.39	11	Ar	17.05
Ap	alf	0.5403	I	4.44	56.35	11	Ar	20.26
A1	alf	0.3210	I	2.56	52.90	11	ArL	17.69
Ap	mol	0.3353	I	18.30	33.88	21	FArL	20.27
A1	mol	0.2571	I	19.50	26.60	21	FL	19.19
Ap	mol	0.3280	I	25.79	32.71	21	FAr	24.16
A1	mol	0.3785	I	6.46	30.40	21	FArL	22.49
Ap	mol	0.4734	I	25.84	29.12	21	FAr	21.02
A1	mol	0.3285	I	23.08	30.57	21	FAr	17.79
Ap	mol	0.3644	I	16.23	28.87	21	FArL	22.79
A1	mol	0.4036	I	13.79	42.45	21	ArL	14.05
Ap	mol	0.3463	I	10.13	31.28	21	FArL	21.56
A1	mol	0.2106	I	18.97	29.82	21	FArL	18.52
Ap	inc	0.4031	I	25.86	34.47	21	FAr	13.05
A1	inc	0.2903	I	11.52	23.42	21	FL	12.67
Ap	inc	0.3803	I	18.54	21.14	21	FL	11.25
A1	inc	0.4546	I	13.51	15.07	21	FL	10.89
Ap	inc	0.4619	I	28.18	37.04	21	FAr	14.89
A1	inc	0.2500	I	16.40	25.00	21	FL	11.44
Ap	inc	0.4175	I	32.55	27.29	21	FAr	11.51
A1	inc	0.4258	I	24.73	22.78	21	FL	8.24
Ap	inc	0.5250	I	25.32	20.14	21	FL	13.91
A1	inc	0.4233	I	21.96	16.61	21	FL	12.19
Ap	mol	0.3630	I	16.09	41.01	21	ArL	18.63
A1	mol	0.1841	I	19.39	38.16	21	FArL	14.76
Ap	mol	0.2999	I	20.66	33.59	21	FAr	15.31
A1	mol	0.3815	I	20.77	48.18	21	Ar	13.03
Ap	mol	0.4279	I	8.13	43.11	21	FArL	14.70
A1	mol	0.4772	I	16.37	36.13	21	FArL	13.36
Ap	mol	0.5020	I	5.63	58.33	21	Ar	13.81
A1	mol	0.3021	I	9.36	50.60	21	ArL	13.99
Ap	mol	0.2736	I	16.97	43.93	21	Ar	15.53
A1	mol	0.2214	I	14.63	35.12	21	FArL	16.54
Ap	ver	0.3973	I	10.17	36.70	21	FArL	19.90
A1	ver	0.3381	I	17.96	43.04	21	Ar	17.91
Ap	ver	0.2025	I	16.11	40.89	21	ArL	19.16
A1	ver	0.3038	I	14.05	41.64	21	ArL	16.21
Ap	ver	0.5380	I	34.90	24.92	21	F	16.64
A1	ver	0.2997	I	41.36	22.99	21	F	10.06
Ap	ver	0.3447	I	22.30	35.18	21	FAr	16.23
A1	ver	0.2756	I	24.58	35.79	21	FAr	12.82
Ap	ver	0.4493	I	11.87	38.73	21	FArL	22.65
A1	ver	0.3565	I	13.36	35.89	21	FArL	17.50
Ap	ver	0.4146	I	8.97	66.23	21	Ar	31.91

A1	ver	0.3863	I	8.61	66.30	21	Ar	19.43
Ap	ver	0.2851	I	3.33	67.98	21	Ar	17.23
A1	ver	0.2530	I	1.84	64.53	21	Ar	20.34
Ap	ver	0.2038	I	6.26	59.25	21	Ar	18.31
A1	ver	0.2653	I	6.62	61.26	21	Ar	16.54
Ap	ver	0.4240	I	7.65	70.15	21	Ar	19.42
A1	ver	0.2940	I	8.76	63.32	21	Ar	19.56
Ap	ver	0.3126	I	11.48	57.15	21	Ar	15.92
A1	ver	0.2456	I	13.19	60.70	21	Ar	15.64
Ap	mol	0.1965	I	41.40	42.26	21	Ar	14.81
A1	mol	0.3024	I	31.49	34.79	21	FAr	12.11
Ap	mol	0.2381	I	18.95	36.37	21	FArL	17.05
A1	mol	0.1961	I	23.58	44.80	21	Ar	13.54
Ap	mol	0.3809	I	32.84	21.82	21	F	10.91
A1	mol	0.3090	I	31.19	22.20	21	F	9.02
Ap	mol	0.3140	I	40.60	25.97	21	F	9.18
A1	mol	0.2522	I	39.78	22.22	21	F	9.35
Ap	mol	0.2968	I	14.56	40.83	21	ArL	18.76
A1	mol	0.2205	I	16.30	54.06	21	Ar	13.92
Ap	ver	0.3063	I	32.64	27.97	21	FAr	13.10
A1	ver	0.1986	I	22.05	35.36	21	FAr	10.74
Ap	ver	0.2260	I	35.56	45.76	21	Ar	12.19
A1	ver	0.2148	I	25.52	33.66	21	FAr	10.69
Ap	ver	0.2478	I	32.03	32.71	21	FAr	8.61
A1	ver	0.1896	I	41.97	43.16	21	Ar	10.96
Ap	ver	0.1440	I	40.50	31.77	21	FAr	9.49
A1	ver	0.2616	I	37.86	26.46	21	F	10.16
Ap	ver	0.1930	I	35.53	30.07	21	FAr	9.51
A1	ver	0.3068	I	31.78	26.60	21	F	8.97
Ap	ver	0.2667	I	17.18	36.90	21	FArL	15.16
A1	ver	0.1651	I	19.36	36.16	21	FArL	16.32
Ap	ver	0.2209	I	23.33	34.56	21	FAr	16.05
A1	ver	0.1717	I	22.54	32.67	21	FAr	14.03
Ap	ver	0.2148	I	20.36	42.96	21	Ar	15.95
A1	ver	0.1908	I	20.66	41.75	21	Ar	15.46
Ap	ver	0.2307	I	22.62	51.60	21	Ar	17.20
A1	ver	0.1820	I	17.75	44.34	21	Ar	15.70
Ap	ver	0.2510	I	27.50	34.88	21	FAr	11.81
A1	ver	0.2176	I	28.86	38.14	21	FAr	9.96
Ap	mol	0.2721	I	32.59	28.05	21	FAr	14.45
A1	mol	0.3915	I	31.57	29.23	21	FAr	13.60
Ap	mol	0.2443	I	36.59	25.51	21	F	13.80
A1	mol	0.2571	I	36.33	24.65	21	F	13.45
Ap	mol	0.3471	I	16.59	36.64	21	FArL	21.34
A1	mol	0.4706	I	13.71	44.77	21	ArL	19.15
Ap	mol	0.3774	I	19.47	34.10	21	FArL	21.06
A1	mol	0.1861	I	19.58	34.55	21	FArL	20.22
Ap	mol	0.3038	I	41.39	26.95	21	F	9.76
Ap	ult	0.2558	I	10.73	66.76	11	Ar	16.72
A1	ult	0.1791	I	8.74	57.86	11	Ar	16.41
Ap	ult	0.2974	I	21.13	40.19	11	Ar	13.04
A1	ult	0.2597	I	18.90	45.27	11	Ar	12.20
Ap	ult	0.3245	I	3.25	57.94	11	Ar	17.26

A1	ult	0.2898	I	3.10	54.56	11	ArL	16.58
Ap	ult	0.2934	I	15.97	40.38	11	ArL	17.39
A1	ult	0.2121	I	13.87	43.86	11	ArL	16.33
Ap	ult	0.3430	I	13.67	42.14	11	ArL	17.00
A1	ult	0.3004	I	16.39	40.93	11	ArL	16.10
Ap	alf	0.5840	II	10.38	64.23	11	Ar	26.03
A1	alf	0.5785	II	8.10	59.26	11	Ar	23.09
Ap	alf	0.6464	II	4.80	49.13	11	ArL	28.23
A1	alf	0.3420	II	8.67	71.27	11	Ar	21.55
Ap	alf	0.5238	II	4.51	65.10	11	Ar	22.07
A1	alf	0.2507	II	7.11	79.04	11	Ar	19.41
Ap	alf	0.3273	II	8.53	54.07	11	Ar	24.84
A1	alf	0.5590	II	9.39	64.87	11	Ar	23.42
Ap	alf	0.5602	II	12.38	52.55	11	Ar	23.32
A1	alf	0.6127	II	11.55	51.85	11	Ar	23.11
Ap	alf	0.3641	II	7.90	47.01	11	ArL	22.02
A1	alf	0.4241	II	7.28	44.79	11	ArL	20.94
Ap	alf	0.2656	II	18.17	47.18	11	Ar	19.60
A1	alf	0.3138	II	15.51	42.29	11	ArL	15.77
Ap	alf	0.2977	II	18.84	40.47	11	ArL	19.33
A1	alf	0.4202	II	17.84	40.47	11	ArL	18.63
Ap	alf	0.3483	II	14.00	69.12	11	Ar	18.12
A1	alf	0.4989	II	9.96	51.87	11	Ar	20.84
Ap	alf	0.3807	II	18.60	74.78	11	Ar	19.78
A1	alf	0.4213	II	14.93	47.65	11	Ar	19.12
Ap	alf	0.3798	II	15.97	47.87	11	Ar	17.41
A1	alf	0.2165	II	13.57	49.12	11	Ar	18.23
Ap	mol	0.4275	II	20.21	35.41	21	FAr	20.51
A1	mol	0.2508	II	19.97	33.38	21	FArL	20.13
Ap	mol	0.3790	II	20.36	33.39	21	FAr	17.14
A1	mol	0.3108	II	21.48	31.69	21	FAr	17.64
Ap	mol	0.2690	II	34.99	25.09	21	F	14.03
A1	mol	0.3559	II	37.05	24.00	21	F	16.72
Ap	mol	0.2526	II	26.78	34.45	21	FAr	18.95
A1	mol	0.3768	II	27.61	35.04	21	FAr	16.38
Ap	mol	0.2065	II	15.35	27.85	21	FArL	22.94
A1	mol	0.4220	II	20.81	49.36	21	Ar	20.74
Ap	ver	0.3716	II	10.79	53.37	21	Ar	34.01
A1	ver	0.3630	II	2.25	62.21	21	Ar	18.72
Ap	ver	0.3349	II	10.60	56.20	21	Ar	18.63
A1	ver	0.3285	II	8.90	51.11	21	Ar	17.92
Ap	ver	0.3773	II	38.57	31.49	21	FAr	18.55
A1	ver	0.3721	II	38.87	27.64	21	FAr	13.35
Ap	ver	0.4179	II	14.64	52.95	21	Ar	23.05
A1	ver	0.2835	II	17.35	50.44	21	Ar	20.97
Ap	ver	0.6217	II	7.41	56.58	21	Ar	25.47
A1	ver	0.5434	II	5.57	58.74	21	Ar	20.46
Ap	ult	0.5690	II	15.83	55.17	11	Ar	18.91
A1	ult	0.3097	II	17.68	56.09	11	Ar	19.45
Ap	ult	0.7132	II	15.18	54.51	11	Ar	18.73
A1	ult	0.3913	II	15.66	53.86	11	Ar	18.83
Ap	ult	0.3204	II	10.43	59.85	11	Ar	19.04
A1	ult	0.3729	II	12.54	60.10	11	Ar	18.46
Ap	ult	0.5328	II	13.98	53.62	11	Ar	19.21

A1	ult	0.5946	II	9.47	62.95	11	Ar	18.53
Ap	ult	0.4618	II	13.13	59.75	11	Ar	22.68
A1	ult	0.2399	II	15.25	56.17	11	Ar	18.43
Ap	ult	0.3744	II	8.86	73.20	11	Ar	28.17
A1	ult	0.2237	II	8.26	65.26	11	Ar	30.55
Ap	ult	0.3548	II	6.15	73.06	11	Ar	19.43
A1	ult	0.2209	II	6.83	57.02	11	Ar	19.08
Ap	ult	0.2480	II	4.12	72.62	11	Ar	17.97
A1	ult	0.4954	II	4.82	73.13	11	Ar	17.13
Ap	ult	0.3791	II	15.61	49.49	11	Ar	18.58
A1	ult	0.2629	II	15.09	51.37	11	Ar	17.26
Ap	ult	0.2296	II	6.56	78.58	11	Ar	33.25
A1	ult	0.2537	II	4.25	63.48	11	Ar	30.15
Ap	alf	0.3965	II	15.29	50.02	11	Ar	15.54
A1	alf	0.3030	II	12.12	48.84	11	Ar	15.79
Ap	alf	0.3023	II	6.73	55.83	11	Ar	16.77
A1	alf	0.4141	II	4.89	55.48	11	Ar	19.30
Ap	alf	0.4994	II	7.26	50.70	11	ArL	22.00
A1	alf	0.2699	II	3.70	54.45	11	ArL	20.07
Ap	alf	0.3217	II	22.58	36.16	11	FAr	20.11
A1	alf	0.1963	II	17.04	42.41	11	ArL	18.06
Ap	alf	0.2555	II	9.10	50.45	11	ArL	22.83
A1	alf	0.2081	II	8.70	52.14	11	Ar	16.91
Ap	alf	0.3916	II	4.73	66.83	11	Ar	21.07
A1	alf	0.1578	II	5.09	67.28	11	Ar	19.39
Ap	alf	0.3031	II	2.71	73.70	11	Ar	25.66
A1	alf	0.2567	II	3.34	70.13	11	Ar	20.40
Ap	alf	0.5850	II	3.07	67.56	11	Ar	15.45
A1	alf	0.2999	II	2.52	66.74	11	Ar	15.29
Ap	alf	0.5630	II	3.56	67.57	11	Ar	17.75
A1	alf	0.3264	II	4.05	83.39	11	Ar	17.05
Ap	alf	0.4799	II	4.44	56.35	11	Ar	20.26
A1	alf	0.3927	II	2.56	52.90	11	ArL	17.69
Ap	mol	0.5286	II	18.30	33.88	21	FArL	20.27
A1	mol	0.2939	II	19.50	26.60	21	FL	19.19
Ap	mol	0.3895	II	25.79	32.71	21	FAr	24.16
A1	mol	0.4709	II	6.46	30.40	21	FArL	22.49
Ap	mol	0.4685	II	25.84	29.12	21	FAr	21.02
A1	mol	0.3897	II	23.08	30.57	21	FAr	17.79
Ap	mol	0.4090	II	16.23	28.87	21	FArL	22.79
A1	mol	0.2636	II	13.79	42.45	21	ArL	14.05
Ap	mol	0.2520	II	10.13	31.28	21	FArL	21.56
A1	mol	0.2809	II	18.97	29.82	21	FArL	18.52
Ap	inc	0.3430	II	25.86	34.47	21	FAr	13.05
A1	inc	0.3733	II	11.52	23.42	21	FL	12.67
Ap	inc	0.5087	II	18.54	21.14	21	FL	11.25
A1	inc	0.2263	II	13.51	15.07	21	FL	10.89
Ap	inc	0.5222	II	28.18	37.04	21	FAr	14.89
A1	inc	0.2735	II	16.40	25.00	21	FL	11.44
Ap	inc	0.4779	II	32.55	27.29	21	FAr	11.51
A1	inc	0.4093	II	24.73	22.78	21	FL	8.24
Ap	inc	0.4439	II	25.32	20.14	21	FL	13.91
A1	inc	0.6315	II	21.96	16.61	21	FL	12.19

Ap	mol	0.3198	II	16.09	41.01	21	ArL	18.63
A1	mol	0.3088	II	19.39	38.16	21	FArL	14.76
Ap	mol	0.3266	II	20.66	33.59	21	FAr	15.31
A1	mol	0.4040	II	20.77	48.18	21	Ar	13.03
Ap	mol	0.3655	II	8.13	43.11	21	FArL	14.70
A1	mol	0.3382	II	16.37	36.13	21	FArL	13.36
Ap	mol	0.4303	II	5.63	58.33	21	Ar	13.81
A1	mol	0.5926	II	9.36	50.60	21	ArL	13.99
Ap	mol	0.4455	II	16.97	43.93	21	Ar	15.53
A1	mol	0.4726	II	14.63	35.12	21	FArL	16.54
Ap	ver	0.4111	II	10.17	36.70	21	FArL	19.90
A1	ver	0.2870	II	17.96	43.04	21	Ar	17.91
Ap	ver	0.3184	II	16.11	40.89	21	ArL	19.16
A1	ver	0.3971	II	14.05	41.64	21	ArL	16.21
Ap	ver	0.3963	II	34.90	24.92	21	F	16.64
A1	ver	0.3149	II	41.36	22.99	21	F	10.06
Ap	ver	0.3310	II	22.30	35.18	21	FAr	16.23
A1	ver	0.3435	II	24.58	35.79	21	FAr	12.82
Ap	ver	0.4842	II	11.87	38.73	21	FArL	22.65
A1	ver	0.2710	II	13.36	35.89	21	FArL	17.50
Ap	ver	0.5216	II	8.97	66.23	21	Ar	31.91
A1	ver	0.5197	II	8.61	66.30	21	Ar	19.43
Ap	ver	0.5567	II	3.33	67.98	21	Ar	17.23
A1	ver	0.2541	II	1.84	64.53	21	Ar	20.34
Ap	ver	0.5867	II	6.26	59.25	21	Ar	18.31
A1	ver	0.3041	II	6.62	61.26	21	Ar	16.54
Ap	ver	0.4007	II	7.65	70.15	21	Ar	19.42
A1	ver	0.5283	II	8.76	63.32	21	Ar	19.56
Ap	ver	0.3807	II	11.48	57.15	21	Ar	15.92
A1	ver	0.4957	II	13.19	60.70	21	Ar	15.64
Ap	mol	0.2254	II	41.40	42.26	21	Ar	14.81
A1	mol	0.3976	II	31.49	34.79	21	FAr	12.11
Ap	mol	0.4102	II	18.95	36.37	21	FArL	17.05
A1	mol	0.3102	II	23.58	44.80	21	Ar	13.54
Ap	mol	0.3148	II	32.84	21.82	21	F	10.91
A1	mol	0.3587	II	31.19	22.20	21	F	9.02
Ap	mol	0.4102	II	40.60	25.97	21	F	9.18
A1	mol	0.5863	II	39.78	22.22	21	F	9.35
Ap	mol	0.4242	II	14.56	40.83	21	ArL	18.76
A1	mol	0.3644	II	16.30	54.06	21	Ar	13.92
Ap	ver	0.2239	II	32.64	27.97	21	FAr	13.10
A1	ver	0.2290	II	22.05	35.36	21	FAr	10.74
Ap	ver	0.2854	II	35.56	45.76	21	Ar	12.19
A1	ver	0.2651	II	25.52	33.66	21	FAr	10.69
Ap	ver	0.3647	II	32.03	32.71	21	FAr	8.61
A1	ver	0.2644	II	41.97	43.16	21	Ar	10.96
Ap	ver	0.1855	II	40.50	31.77	21	FAr	9.49
A1	ver	0.2860	II	37.86	26.46	21	F	10.16
Ap	ver	0.2289	II	35.53	30.07	21	FAr	9.51
A1	ver	0.3324	II	31.78	26.60	21	F	8.97
Ap	ver	0.3425	II	17.18	36.90	21	FArL	15.16
A1	ver	0.3706	II	19.36	36.16	21	FArL	16.32
Ap	ver	0.3626	II	23.33	34.56	21	FAr	16.05
A1	ver	0.3412	II	22.54	32.67	21	FAr	14.03

Ap	ver	0.2710	II	20.36	42.96	21	Ar	15.95
A1	ver	0.1227	II	20.66	41.75	21	Ar	15.46
Ap	ver	0.2828	II	22.62	51.60	21	Ar	17.20
A1	ver	0.2500	II	17.75	44.34	21	Ar	15.70
Ap	ver	0.2754	II	27.50	34.88	21	FAr	11.81
A1	ver	0.3238	II	28.86	38.14	21	FAr	9.96
Ap	mol	0.4933	II	32.59	28.05	21	FAr	14.45
A1	mol	0.3405	II	31.57	29.23	21	FAr	13.60
Ap	mol	0.3122	II	36.59	25.51	21	F	13.80
A1	mol	0.2324	II	36.33	24.65	21	F	13.45
Ap	mol	0.3424	II	16.59	36.64	21	FArL	21.34
A1	mol	0.3479	II	13.71	44.77	21	ArL	19.15
Ap	mol	0.3948	II	19.47	34.10	21	FArL	21.06
A1	mol	0.2868	II	19.58	34.55	21	FArL	20.22
Ap	mol	0.5199	II	41.39	26.95	21	F	9.76
Ap	ult	0.3067	II	10.73	66.76	11	Ar	16.72
A1	ult	0.3374	II	8.74	57.86	11	Ar	16.41
Ap	ult	0.3141	II	21.13	40.19	11	Ar	13.04
A1	ult	0.2901	II	18.90	45.27	11	Ar	12.20
Ap	ult	0.4858	II	3.25	57.94	11	Ar	17.26
A1	ult	0.2818	II	3.10	54.56	11	ArL	16.58
Ap	ult	0.2845	II	15.97	40.38	11	ArL	17.39
A1	ult	0.2277	II	13.87	43.86	11	ArL	16.33
Ap	ult	0.2644	II	13.67	42.14	11	ArL	17.00
A1	ult	0.3582	II	16.39	40.93	11	ArL	16.10
Ap	alf	0.6118	III	10.38	64.23	11	Ar	26.03
A1	alf	0.4478	III	8.10	59.26	11	Ar	23.09
Ap	alf	0.6989	III	4.80	49.13	11	ArL	28.23
A1	alf	0.4737	III	8.67	71.27	11	Ar	21.55
Ap	alf	0.5794	III	4.51	65.10	11	Ar	22.07
A1	alf	0.4567	III	7.11	79.04	11	Ar	19.41
Ap	alf	0.4048	III	8.53	54.07	11	Ar	24.84
A1	alf	0.6598	III	9.39	64.87	11	Ar	23.42
Ap	alf	0.6886	III	12.38	52.55	11	Ar	23.32
A1	alf	0.3990	III	11.55	51.85	11	Ar	23.11
Ap	alf	0.7526	III	7.90	47.01	11	ArL	22.02
A1	alf	0.4572	III	7.28	44.79	11	ArL	20.94
Ap	alf	0.4643	III	18.17	47.18	11	Ar	19.60
A1	alf	0.3766	III	15.51	42.29	11	ArL	15.77
Ap	alf	0.6545	III	18.84	40.47	11	ArL	19.33
A1	alf	0.6973	III	17.84	40.47	11	ArL	18.63
Ap	alf	0.6005	III	14.00	69.12	11	Ar	18.12
A1	alf	0.3243	III	9.96	51.87	11	Ar	20.84
Ap	alf	0.3858	III	18.60	74.78	11	Ar	19.78
A1	alf	0.2663	III	14.93	47.65	11	Ar	19.12
Ap	alf	0.4891	III	15.97	47.87	11	Ar	17.41
A1	alf	0.5425	III	13.57	49.12	11	Ar	18.23
Ap	mol	0.2338	III	20.21	35.41	21	FAr	20.51
A1	mol	0.2439	III	19.97	33.38	21	FArL	20.13
Ap	mol	0.5279	III	20.36	33.39	21	FAr	17.14
A1	mol	0.4411	III	21.48	31.69	21	FAr	17.64
Ap	mol	0.6311	III	34.99	25.09	21	F	14.03
A1	mol	0.3233	III	37.05	24.00	21	F	16.72

Ap	mol	0.2951	III	26.78	34.45	21	FAr	18.95
A1	mol	0.4481	III	27.61	35.04	21	FAr	16.38
Ap	mol	0.7592	III	15.35	27.85	21	FArL	22.94
A1	mol	0.3210	III	20.81	49.36	21	Ar	20.74
Ap	ver	0.3647	III	10.79	53.37	21	Ar	34.01
A1	ver	0.2755	III	2.25	62.21	21	Ar	18.72
Ap	ver	0.4720	III	10.60	56.20	21	Ar	18.63
A1	ver	0.4202	III	8.90	51.11	21	Ar	17.92
Ap	ver	0.2829	III	38.57	31.49	21	FAr	18.55
A1	ver	0.3307	III	38.87	27.64	21	FAr	13.35
Ap	ver	0.5398	III	14.64	52.95	21	Ar	23.05
A1	ver	0.3582	III	17.35	50.44	21	Ar	20.97
Ap	ver	0.3662	III	7.41	56.58	21	Ar	25.47
A1	ver	0.4765	III	5.57	58.74	21	Ar	20.46
Ap	ult	0.3402	III	15.83	55.17	11	Ar	18.91
A1	ult	0.3045	III	17.68	56.09	11	Ar	19.45
Ap	ult	0.3955	III	15.18	54.51	11	Ar	18.73
A1	ult	0.3965	III	15.66	53.86	11	Ar	18.83
Ap	ult	0.2966	III	10.43	59.85	11	Ar	19.04
A1	ult	0.6623	III	12.54	60.10	11	Ar	18.46
Ap	ult	0.4778	III	13.98	53.62	11	Ar	19.21
A1	ult	0.2954	III	9.47	62.95	11	Ar	18.53
Ap	ult	0.6389	III	13.13	59.75	11	Ar	22.68
A1	ult	0.3771	III	15.25	56.17	11	Ar	18.43
Ap	ult	0.4617	III	8.86	73.20	11	Ar	28.17
A1	ult	0.3124	III	8.26	65.26	11	Ar	30.55
Ap	ult	0.2804	III	6.15	73.06	11	Ar	19.43
A1	ult	0.4665	III	6.83	57.02	11	Ar	19.08
Ap	ult	0.3298	III	4.12	72.62	11	Ar	17.97
A1	ult	0.4887	III	4.82	73.13	11	Ar	17.13
Ap	ult	0.2965	III	15.61	49.49	11	Ar	18.58
A1	ult	0.2708	III	15.09	51.37	11	Ar	17.26
Ap	ult	0.4790	III	6.56	78.58	11	Ar	33.25
A1	ult	0.3908	III	4.25	63.48	11	Ar	30.15
Ap	alf	0.3264	III	15.29	50.02	11	Ar	15.54
A1	alf	0.3080	III	12.12	48.84	11	Ar	15.79
Ap	alf	0.4750	III	6.73	55.83	11	Ar	16.77
A1	alf	0.3792	III	4.89	55.48	11	Ar	19.30
Ap	alf	0.3641	III	7.26	50.70	11	ArL	22.00
A1	alf	0.0990	III	3.70	54.45	11	ArL	20.07
Ap	alf	0.4712	III	22.58	36.16	11	FAr	20.11
A1	alf	0.3029	III	17.04	42.41	11	ArL	18.06
Ap	alf	0.5008	III	9.10	50.45	11	ArL	22.83
A1	alf	0.5831	III	8.70	52.14	11	Ar	16.91
Ap	alf	0.4391	III	4.73	66.83	11	Ar	21.07
A1	alf	0.3488	III	5.09	67.28	11	Ar	19.39
Ap	alf	0.6327	III	2.71	73.70	11	Ar	25.66
A1	alf	0.3748	III	3.34	70.13	11	Ar	20.40
Ap	alf	0.5104	III	3.07	67.56	11	Ar	15.45
A1	alf	0.4662	III	2.52	66.74	11	Ar	15.29
Ap	alf	0.4955	III	3.56	67.57	11	Ar	17.75
A1	alf	0.4689	III	4.05	83.39	11	Ar	17.05
Ap	alf	0.6968	III	4.44	56.35	11	Ar	20.26
A1	alf	0.3515	III	2.56	52.90	11	ArL	17.69

Ap	mol	0.4161	III	18.30	33.88	21	FArL	20.27
A1	mol	0.4732	III	19.50	26.60	21	FL	19.19
Ap	mol	0.4262	III	25.79	32.71	21	FAr	24.16
A1	mol	0.3152	III	6.46	30.40	21	FArL	22.49
Ap	mol	0.4940	III	25.84	29.12	21	FAr	21.02
A1	mol	0.6211	III	23.08	30.57	21	FAr	17.79
Ap	mol	0.6415	III	16.23	28.87	21	FArL	22.79
A1	mol	0.3968	III	13.79	42.45	21	ArL	14.05
Ap	mol	0.2884	III	10.13	31.28	21	FArL	21.56
A1	mol	0.3915	III	18.97	29.82	21	FArL	18.52
Ap	inc	0.5715	III	25.86	34.47	21	FAr	13.05
A1	inc	0.2510	III	11.52	23.42	21	FL	12.67
Ap	inc	0.5063	III	18.54	21.14	21	FL	11.25
A1	inc	0.3900	III	13.51	15.07	21	FL	10.89
Ap	inc	0.5606	III	28.18	37.04	21	FAr	14.89
A1	inc	0.4535	III	16.40	25.00	21	FL	11.44
Ap	inc	0.6205	III	32.55	27.29	21	FAr	11.51
A1	inc	0.2836	III	24.73	22.78	21	FL	8.24
Ap	inc	0.7047	III	25.32	20.14	21	FL	13.91
A1	inc	0.6937	III	21.96	16.61	21	FL	12.19
Ap	mol	0.3622	III	16.09	41.01	21	ArL	18.63
A1	mol	0.4124	III	19.39	38.16	21	FArL	14.76
Ap	mol	0.5040	III	20.66	33.59	21	FAr	15.31
A1	mol	0.3707	III	20.77	48.18	21	Ar	13.03
Ap	mol	0.4308	III	8.13	43.11	21	FArL	14.70
A1	mol	0.3836	III	16.37	36.13	21	FArL	13.36
Ap	mol	0.4419	III	5.63	58.33	21	Ar	13.81
A1	mol	0.2742	III	9.36	50.60	21	ArL	13.99
Ap	mol	0.7003	III	16.97	43.93	21	Ar	15.53
A1	mol	0.4846	III	14.63	35.12	21	FArL	16.54
Ap	ver	0.3949	III	10.17	36.70	21	FArL	19.90
A1	ver	0.2475	III	17.96	43.04	21	Ar	17.91
Ap	ver	0.4853	III	16.11	40.89	21	ArL	19.16
A1	ver	0.4367	III	14.05	41.64	21	ArL	16.21
Ap	ver	0.4703	III	34.90	24.92	21	F	16.64
A1	ver	0.2633	III	41.36	22.99	21	F	10.06
Ap	ver	0.2123	III	22.30	35.18	21	FAr	16.23
A1	ver	0.3013	III	24.58	35.79	21	FAr	12.82
Ap	ver	0.5686	III	11.87	38.73	21	FArL	22.65
A1	ver	0.3077	III	13.36	35.89	21	FArL	17.50
Ap	ver	0.4204	III	8.97	66.23	21	Ar	31.91
A1	ver	0.4697	III	8.61	66.30	21	Ar	19.43
Ap	ver	0.4590	III	3.33	67.98	21	Ar	17.23
A1	ver	0.4095	III	1.84	64.53	21	Ar	20.34
Ap	ver	0.4067	III	6.26	59.25	21	Ar	18.31
A1	ver	0.5176	III	6.62	61.26	21	Ar	16.54
Ap	ver	0.5268	III	7.65	70.15	21	Ar	19.42
A1	ver	0.7554	III	8.76	63.32	21	Ar	19.56
Ap	ver	0.3804	III	11.48	57.15	21	Ar	15.92
A1	ver	0.3243	III	13.19	60.70	21	Ar	15.64
Ap	mol	0.1773	III	41.40	42.26	21	Ar	14.81
A1	mol	0.3916	III	31.49	34.79	21	FAr	12.11
Ap	mol	0.4336	III	18.95	36.37	21	FArL	17.05

A1	mol	0.2144	III	23.58	44.80	21	Ar	13.54
Ap	mol	0.3777	III	32.84	21.82	21	F	10.91
A1	mol	0.2268	III	31.19	22.20	21	F	9.02
Ap	mol	0.2898	III	40.60	25.97	21	F	9.18
A1	mol	0.2773	III	39.78	22.22	21	F	9.35
Ap	mol	0.2816	III	14.56	40.83	21	ArL	18.76
A1	mol	0.5263	III	16.30	54.06	21	Ar	13.92
Ap	ver	0.2222	III	32.64	27.97	21	FAr	13.10
A1	ver	0.3788	III	22.05	35.36	21	FAr	10.74
Ap	ver	0.2764	III	35.56	45.76	21	Ar	12.19
A1	ver	0.4803	III	25.52	33.66	21	FAr	10.69
Ap	ver	0.3944	III	32.03	32.71	21	FAr	8.61
A1	ver	0.3133	III	41.97	43.16	21	Ar	10.96
Ap	ver	0.3097	III	40.50	31.77	21	FAr	9.49
A1	ver	0.2595	III	37.86	26.46	21	F	10.16
Ap	ver	0.2140	III	35.53	30.07	21	FAr	9.51
A1	ver	0.3112	III	31.78	26.60	21	F	8.97
Ap	ver	0.3492	III	17.18	36.90	21	FArL	15.16
A1	ver	0.4203	III	19.36	36.16	21	FArL	16.32
Ap	ver	0.4133	III	23.33	34.56	21	FAr	16.05
A1	ver	0.3643	III	22.54	32.67	21	FAr	14.03
Ap	ver	0.3245	III	20.36	42.96	21	Ar	15.95
A1	ver	0.3769	III	20.66	41.75	21	Ar	15.46
Ap	ver	0.3902	III	22.62	51.60	21	Ar	17.20
A1	ver	0.2881	III	17.75	44.34	21	Ar	15.70
Ap	ver	0.2974	III	27.50	34.88	21	FAr	11.81
A1	ver	0.2651	III	28.86	38.14	21	FAr	9.96
Ap	mol	0.2299	III	32.59	28.05	21	FAr	14.45
A1	mol	0.2532	III	31.57	29.23	21	FAr	13.60
Ap	mol	0.4609	III	36.59	25.51	21	F	13.80
A1	mol	0.3872	III	36.33	24.65	21	F	13.45
Ap	mol	0.3884	III	16.59	36.64	21	FArL	21.34
A1	mol	0.6159	III	13.71	44.77	21	ArL	19.15
Ap	mol	0.3013	III	19.47	34.10	21	FArL	21.06
A1	mol	0.3442	III	19.58	34.55	21	FArL	20.22
Ap	mol	0.3030	III	41.39	26.95	21	F	9.76
Ap	ult	0.3537	III	10.73	66.76	11	Ar	16.72
A1	ult	0.2062	III	8.74	57.86	11	Ar	16.41
Ap	ult	0.2266	III	21.13	40.19	11	Ar	13.04
A1	ult	0.2758	III	18.90	45.27	11	Ar	12.20
Ap	ult	0.2291	III	3.25	57.94	11	Ar	17.26
A1	ult	0.3916	III	3.10	54.56	11	ArL	16.58
Ap	ult	0.4257	III	15.97	40.38	11	ArL	17.39
A1	ult	0.2311	III	13.87	43.86	11	ArL	16.33
Ap	ult	0.5127	III	13.67	42.14	11	ArL	17.00
A1	ult	0.2759	III	16.39	40.93	11	ArL	16.10;

```
*proc print;
```

```
*run;
```

```
proc glm data = arti2 ;
```

```
class HZ tax tamAgre tex DOM;
```

```
model iFi= HZ tex(HZ) tamAgre(HZ TEX) DOM FAT CO/ss4;
```

```
output out=pout predicted= IFi;
```

```
*manova h= dom_especifico hz dom_especifico*hz hz*TA dom_especifico*TA
```

```
dom_especifico*TA*hz CO /printe printh;
```

```
*lsmeans dom_especifico hz dom_especifico*hz hz*TA dom_especifico*TA
dom_especifico*TA*hz/ADJUST=TUKEY;
means HZ tex/lsd;
title1 'MANOVA DESBALANCEADO arti2';
run;
```

**Aclaración:** tamaño de agregado I = 2.0-9.49 mm, II = 9.50-19.00 mm y III = 19.01-35.70 mm.

**Tabla 3-D:** Información de los niveles por factor.

Clases	Niveles	Valores
Horizonte	2	Ap-A1
Tamaño de agregados	3	I II III
Textura	6	Ar ArL F FAr FArL FL
Dominio mineralógico	2	1:1 2:1
Número de observaciones	543	

Horizonte (Hz); tamaño agregados (tam agre); textura (tex); dominio mineralógico (dom); I: 2.0 a 9.49 mm, II: 9.50 a 19.00 mm, III: 19.01 a 35.70 mm.

**Tabla 4-D:** Análisis de covarianza.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Cociente F	Pr > F
Horizonte	1	0.27681788	0.27681788	24.10	<0.0001
Textura (horizonte)	10	0.28803856	0.02880386	2.51	0.0060
Tamaño agregados (horizonte*textura)	24	0.84337175	0.03514049	3.06	<0.0001
Dominio mineralógico	1	0.00154934	0.00154934	0.13	0.7136
Fracción arena total	1	0.15269663	0.15269663	13.29	0.0003
Carbono orgánico	1	0.08983086	0.08983086	7.82	0.0054
Modelo	38	1.81176562	0.04767804	4.15	<0.0001
Error	504	5.78983397	0.01148777		
Total corregido	542	7.60159959			

Horizonte (Hz); tamaño agregados (tam agre); textura (tex); dominio mineralógico (dom); fracción arena total (FAT); carbono orgánico (CO).

## Anexo E

### Información complementaria análisis estadístico artículo 4

#### Relación de la friabilidad con diferentes propiedades físicas y químicas de los suelos bajo cultivo de caña de azúcar en sectores del Valle Geográfico del Río Cauca, Colombia

**Tabla 1-E:** Medidas de tendencia central y dispersión de las variables DPM, Ea, Da, Pt, pH, CE e IF<sub>i</sub>.

Variable	No de datos	Media	Mediana	Rango	Máximo	Mínimo	Desviación estándar	Coefficiente de variación (CV, %)
Horizonte Ap								
DPM	91	2.04	1.92	4.58	4.89	0.31	1.27	62.3
Ea	91	60.08	65.41	92.06	98.77	6.71	25.40	42.3
Da	91	1.35	1.34	0.80	1.84	1.05	0.15	11.1
Pt	91	46.10	46.74	29.14	56.26	27.12	5.92	12.8
pH	91	6.27	6.00	4.8	8.8	4.0	1.15	18.3
CE	91	0.95	0.65	3.54	3.74	0.20	0.85	89.5
IF <sub>i</sub> 2.0-9.49 mm	91	0.35	0.34	0.56	0.71	0.14	0.10	28.6
IF <sub>i</sub> 9.50-19.00 mm	91	0.39	0.38	0.53	0.71	0.19	0.11	28.2
IF <sub>i</sub> 19.00-35.70 mm	91	0.44	0.43	0.58	0.76	0.18	0.13	29.5
Horizonte A1								
DPM	91	1.95	1.71	4.85	5.14	0.29	1.27	65.1
Ea	91	58.59	67.21	89.71	96.72	7.01	24.75	42.2
Da	91	1.39	1.40	0.77	1.81	1.05	0.13	9.35
Pt	91	44.91	44.62	29.60	58.12	28.52	4.59	10.2
pH	91	6.36	6.20	4.5	8.7	4.2	1.15	18.1
CE	91	0.84	0.61	4.06	4.25	0.19	0.69	82.1
IF <sub>i</sub> 2.0-9.49 mm	91	0.30	0.29	0.31	0.48	0.17	0.07	23.3
IF <sub>i</sub> 9.50-19.00 mm	91	0.35	0.33	0.51	0.63	0.12	0.11	31.4
IF <sub>i</sub> 19.01-35.70 mm	91	0.39	0.38	0.66	0.76	0.10	0.12	30.8

### Algoritmo para el análisis de covarianza multivariante

**data** artic3;

input samp \$ IF<sub>i</sub>2.0-9.49mm IF<sub>i</sub>9.50-19.00mm IF<sub>i</sub>19.01-35.70mm Da Pt  
Ea DPM pH CE tax \$@@;

datalines;

Ap	0.342	0.584	0.612	1.089	56.262	77.644	2.149	5.4	0.29	alf
A1	0.267	0.578	0.448	1.294	49.126	83.081	2.979	5.5	0.26	alf
Ap	0.379	0.646	0.700	1.137	54.710	77.460	2.328	6.1	0.49	alf
A1	0.266	0.342	0.474	1.303	47.820	88.221	3.475	6.1	0.30	alf
Ap	0.284	0.524	0.579	1.184	52.240	78.094	1.916	5.4	0.27	alf
A1	0.352	0.251	0.457	1.192	50.560	77.301	1.995	6.0	0.25	alf
Ap	0.295	0.328	0.405	1.340	46.670	89.449	4.496	5.3	0.31	alf
A1	0.298	0.559	0.660	1.366	45.410	85.266	4.153	5.7	0.27	alf
Ap	0.418	0.561	0.689	1.146	55.180	87.792	3.208	5.4	0.46	alf
A1	0.240	0.613	0.399	1.261	50.410	81.156	3.261	5.6	0.38	alf
Ap	0.249	0.364	0.753	1.252	50.900	79.931	3.201	5.9	0.28	alf
A1	0.294	0.424	0.457	1.218	52.550	82.105	2.369	5.2	0.33	alf
Ap	0.441	0.265	0.464	1.329	48.160	76.025	3.071	5.9	0.45	alf
A1	0.278	0.313	0.377	1.260	50.680	72.628	2.750	5.8	0.32	alf
Ap	0.434	0.298	0.654	1.259	47.680	72.097	3.260	5.5	0.31	alf
A1	0.256	0.420	0.697	1.294	48.710	69.817	2.569	5.9	0.30	alf
Ap	0.339	0.348	0.600	1.220	51.960	86.416	3.764	5.7	0.36	alf
A1	0.255	0.499	0.324	1.280	48.860	85.135	3.940	6.2	0.36	alf
Ap	0.315	0.381	0.386	1.294	49.680	77.372	3.047	5.4	0.50	alf
A1	0.417	0.421	0.266	1.267	49.950	82.046	3.320	5.7	0.66	alf
Ap	0.376	0.379	0.489	1.259	49.990	79.790	3.226	4.6	3.74	alf
A1	0.347	0.216	0.542	1.224	51.380	72.189	2.582	5.8	0.61	alf
Ap	0.412	0.428	0.234	1.266	48.780	59.957	1.952	7.8	0.98	mol
A1	0.306	0.251	0.244	1.274	48.580	55.190	1.714	7.6	0.91	mol
Ap	0.540	0.379	0.527	1.392	45.300	53.004	1.375	7.3	0.95	mol
A1	0.320	0.311	0.441	1.329	47.850	59.954	1.541	7.8	0.97	mol
Ap	0.466	0.270	0.631	1.356	47.360	16.829	0.484	7.4	0.97	mol
A1	0.314	0.356	0.323	1.495	41.930	22.688	0.586	7.2	1.37	mol
Ap	0.284	0.253	0.295	1.540	38.620	64.967	1.960	7.9	1.13	mol
A1	0.356	0.377	0.448	1.483	40.950	46.460	1.519	7.9	1.38	mol
Ap	0.437	0.206	0.759	1.401	44.540	36.123	0.824	8.4	1.51	mol
A1	0.338	0.422	0.321	1.325	47.240	44.477	0.943	8.3	1.14	mol
Ap	0.340	0.372	0.365	1.372	41.540	47.913	1.123	8.1	3.05	ver
A1	0.361	0.363	0.275	1.115	53.360	53.116	0.859	8.4	1.23	ver
Ap	0.283	0.335	0.472	1.519	36.050	59.233	1.378	7.7	1.14	ver
A1	0.449	0.328	0.420	1.385	42.880	37.830	0.610	8.3	1.15	ver
Ap	0.342	0.377	0.283	1.364	46.740	57.245	1.953	8.4	1.13	ver
A1	0.275	0.372	0.331	1.590	39.250	41.227	1.253	8.4	1.11	ver
Ap	0.377	0.418	0.540	1.196	50.430	61.340	1.535	8.2	1.51	ver
A1	0.312	0.284	0.358	1.236	49.450	74.301	2.309	8.4	1.40	ver
Ap	0.409	0.622	0.366	1.296	46.170	60.431	1.505	8.3	0.92	ver
A1	0.284	0.543	0.477	1.207	49.590	53.852	0.885	8.4	1.74	ver
Ap	0.516	0.569	0.340	1.249	50.440	88.155	3.614	5.0	0.29	ult
A1	0.375	0.310	0.304	1.451	41.970	72.019	2.335	4.8	0.27	ult
Ap	0.389	0.713	0.396	1.573	36.940	73.574	2.468	5.2	0.26	ult

A1	0.388	0.391	0.397	1.410	43.050	77.360	2.377	4.9	0.49	ult
Ap	0.438	0.320	0.297	1.413	43.200	85.210	3.389	4.7	0.41	ult
A1	0.421	0.373	0.662	1.469	41.260	67.205	1.839	4.7	0.28	ult
Ap	0.709	0.539	0.478	1.323	47.070	75.014	2.401	4.2	0.29	ult
A1	0.372	0.595	0.295	1.406	43.520	82.628	3.278	4.2	0.31	ult
Ap	0.373	0.462	0.639	1.458	41.230	79.299	3.116	4.7	0.39	ult
A1	0.352	0.240	0.378	1.485	41.130	78.405	2.679	4.7	0.29	ult
Ap	0.330	0.374	0.462	1.241	50.020	92.901	3.894	4.0	0.23	ult
A1	0.260	0.224	0.312	1.313	46.760	80.346	3.990	4.9	0.52	ult
Ap	0.457	0.355	0.280	1.429	42.120	89.182	3.769	5.5	0.36	ult
A1	0.278	0.221	0.466	1.500	39.500	77.489	2.726	5.8	0.39	ult
Ap	0.196	0.248	0.330	1.470	38.980	87.686	3.475	5.9	0.37	ult
A1	0.275	0.495	0.489	1.302	47.230	88.334	3.871	5.9	0.46	ult
Ap	0.275	0.380	0.297	1.460	42.320	68.052	2.017	5.1	0.32	ult
A1	0.241	0.263	0.271	1.574	37.830	72.961	2.219	4.8	0.19	ult
Ap	0.370	0.230	0.479	1.497	36.450	77.780	2.902	4.1	0.61	ult
A1	0.424	0.254	0.391	1.384	42.610	80.424	2.867	5.0	0.41	ult
Ap	0.352	0.397	0.326	1.496	41.140	90.264	4.121	5.6	0.38	alf
A1	0.295	0.303	0.308	1.519	40.040	78.096	2.898	5.6	0.27	alf
Ap	0.344	0.302	0.475	1.303	47.690	70.557	2.194	5.6	1.19	alf
A1	0.270	0.414	0.379	1.434	42.130	87.225	4.139	5.7	1.19	alf
Ap	0.417	0.499	0.364	1.437	41.590	91.990	4.889	5.8	0.59	alf
A1	0.346	0.270	0.099	1.436	41.730	90.041	3.741	5.6	2.00	alf
Ap	0.304	0.322	0.471	1.490	39.810	46.934	0.968	6.3	0.44	alf
A1	0.285	0.196	0.303	1.403	43.710	89.174	4.103	6.3	0.48	alf
Ap	0.271	0.255	0.501	1.495	39.830	84.431	3.348	5.8	0.20	alf
A1	0.331	0.208	0.583	1.496	39.830	85.556	3.877	6.1	0.29	alf
Ap	0.447	0.392	0.439	1.463	40.430	92.276	3.984	4.9	0.41	alf
A1	0.268	0.158	0.349	1.368	42.560	96.375	4.991	4.8	0.87	alf
Ap	0.341	0.303	0.633	1.485	38.310	95.236	4.697	5.3	0.40	alf
A1	0.234	0.257	0.375	1.423	39.270	96.716	5.138	5.3	1.20	alf
Ap	0.439	0.585	0.510	1.490	39.690	91.096	3.950	5.4	0.21	alf
A1	0.271	0.300	0.466	1.509	39.640	90.529	4.484	5.2	0.31	alf
Ap	0.447	0.563	0.496	1.564	36.960	88.583	4.007	5.2	0.20	alf
A1	0.286	0.326	0.469	1.492	40.210	89.825	3.977	5.4	0.27	alf
Ap	0.540	0.480	0.697	1.248	48.490	92.894	4.184	4.8	0.37	alf
A1	0.321	0.393	0.351	1.476	40.240	81.798	4.267	5.0	0.44	alf
Ap	0.335	0.529	0.416	1.344	46.810	67.747	2.454	7.9	1.46	mol
A1	0.257	0.294	0.473	1.370	46.280	52.943	1.690	5.2	1.33	mol
Ap	0.328	0.389	0.426	1.397	43.870	35.380	0.993	7.9	2.04	mol
A1	0.378	0.471	0.315	1.327	46.910	57.549	1.458	7.9	1.81	mol
Ap	0.473	0.469	0.494	1.249	50.960	30.657	0.887	7.9	2.10	mol
A1	0.328	0.390	0.621	1.496	41.160	37.833	1.119	7.9	1.90	mol
Ap	0.364	0.409	0.641	1.356	46.440	26.144	0.736	7.8	1.52	mol
A1	0.404	0.264	0.397	1.380	45.170	36.556	0.877	7.9	1.50	mol
Ap	0.346	0.252	0.288	1.290	48.810	48.169	1.543	7.9	1.83	mol
A1	0.211	0.281	0.392	1.431	42.800	53.052	1.664	8.1	1.24	mol
Ap	0.403	0.343	0.571	1.484	44.890	33.216	0.769	8.1	1.16	inc
A1	0.290	0.373	0.251	1.448	45.570	19.357	0.479	7.7	1.08	inc
Ap	0.380	0.509	0.506	1.259	53.880	17.323	0.437	8.8	3.25	inc
A1	0.455	0.226	0.390	1.460	46.510	7.307	0.343	8.7	1.48	inc
Ap	0.462	0.522	0.561	1.243	53.600	10.436	0.345	8.5	3.47	inc
A1	0.250	0.274	0.453	1.450	46.420	11.997	0.335	8.6	2.99	inc
Ap	0.417	0.477	0.621	1.409	48.540	9.344	0.311	7.9	3.65	inc

A1	0.426	0.409	0.284	1.486	45.670	11.278	0.357	8.2	1.39	inc
Ap	0.525	0.444	0.705	1.224	55.180	22.986	0.474	7.2	1.33	inc
A1	0.423	0.632	0.694	1.446	47.280	14.538	0.381	7.8	0.47	inc
Ap	0.363	0.320	0.362	1.155	53.370	86.191	3.800	6.6	1.77	mol
A1	0.184	0.309	0.412	1.244	50.750	77.611	2.752	6.7	0.69	mol
Ap	0.300	0.327	0.504	1.278	49.560	88.805	3.874	6.6	0.75	mol
A1	0.381	0.404	0.371	1.411	44.550	69.162	2.150	6.8	0.69	mol
Ap	0.428	0.365	0.431	1.396	45.520	61.054	1.784	6.8	0.62	mol
A1	0.477	0.338	0.384	1.473	41.850	64.567	2.051	6.6	0.53	mol
Ap	0.502	0.430	0.442	1.277	49.150	64.082	1.084	7.1	0.69	mol
A1	0.302	0.593	0.274	1.314	45.610	70.089	1.372	6.8	0.97	mol
Ap	0.274	0.446	0.700	1.294	47.810	81.679	2.352	7.0	0.59	mol
A1	0.221	0.473	0.485	1.284	47.870	77.312	2.613	6.4	0.61	mol
Ap	0.397	0.411	0.395	1.483	41.260	72.846	2.502	6.1	3.08	ver
A1	0.338	0.287	0.248	1.459	42.330	69.061	2.297	7.2	1.00	ver
Ap	0.202	0.319	0.485	1.391	44.120	61.403	1.875	7.5	0.94	ver
A1	0.304	0.397	0.437	1.357	46.220	60.413	1.594	7.5	1.35	ver
Ap	0.538	0.396	0.470	1.585	38.100	37.300	1.076	7.1	0.91	ver
A1	0.300	0.315	0.263	1.509	42.290	21.427	0.501	7.5	0.78	ver
Ap	0.345	0.331	0.212	1.844	27.120	65.407	2.402	7.1	0.83	ver
A1	0.276	0.344	0.301	1.812	28.520	75.389	2.185	7.4	0.75	ver
Ap	0.449	0.484	0.569	1.446	42.940	98.770	3.049	7.3	0.91	ver
A1	0.356	0.271	0.308	1.611	36.700	75.907	2.335	7.6	1.05	ver
Ap	0.415	0.522	0.420	1.212	47.190	69.583	1.344	6.2	0.84	ver
A1	0.386	0.520	0.470	1.236	46.600	71.605	1.372	7.5	0.49	ver
Ap	0.285	0.557	0.459	1.047	54.280	74.585	1.785	5.7	0.95	ver
A1	0.253	0.254	0.410	1.158	51.340	71.213	1.676	6.3	0.82	ver
Ap	0.204	0.587	0.407	1.310	43.430	67.373	1.435	5.8	0.48	ver
A1	0.266	0.304	0.518	1.334	43.000	64.860	1.163	5.7	0.52	ver
Ap	0.424	0.401	0.527	1.049	55.260	76.459	1.838	5.9	0.49	ver
A1	0.294	0.528	0.755	1.224	48.150	66.932	1.331	6.1	0.50	ver
Ap	0.313	0.381	0.380	1.243	47.680	64.683	1.394	6.0	1.02	ver
A1	0.246	0.496	0.324	1.246	47.750	60.145	1.150	6.1	0.67	ver
Ap	0.197	0.225	0.177	1.583	38.420	73.271	2.989	6.9	0.68	mol
A1	0.302	0.398	0.392	1.511	41.530	55.677	1.584	6.9	0.79	mol
Ap	0.238	0.410	0.434	1.593	37.040	80.875	2.966	6.4	0.83	mol
A1	0.196	0.310	0.214	1.468	42.440	73.841	2.261	6.4	0.52	mol
Ap	0.381	0.315	0.378	1.568	40.370	72.336	2.646	6.5	0.65	mol
A1	0.309	0.359	0.227	1.576	40.760	70.562	2.329	6.9	0.66	mol
Ap	0.314	0.410	0.290	1.495	43.060	39.805	1.050	6.0	0.42	mol
A1	0.252	0.586	0.277	1.641	38.090	29.241	0.619	6.1	0.38	mol
Ap	0.297	0.424	0.282	1.572	37.240	84.377	3.699	5.7	0.78	mol
A1	0.220	0.364	0.526	1.423	43.440	80.233	2.862	6.3	0.62	mol
Ap	0.306	0.223	0.222	1.352	47.780	20.051	0.499	5.8	0.58	ver
A1	0.199	0.229	0.379	1.471	42.980	31.319	0.803	6.3	0.49	ver
Ap	0.226	0.285	0.276	1.411	43.910	35.339	0.662	5.8	0.45	ver
A1	0.215	0.265	0.480	1.419	43.930	31.384	0.585	5.0	2.90	ver
Ap	0.248	0.365	0.394	1.504	40.220	43.314	0.932	5.4	0.48	ver
A1	0.190	0.264	0.313	1.505	40.760	40.941	0.692	5.6	0.46	ver
Ap	0.144	0.185	0.310	1.661	35.860	20.944	0.432	5.7	0.43	ver
A1	0.262	0.286	0.259	1.659	36.820	23.014	0.520	6.2	0.41	ver
Ap	0.193	0.229	0.214	1.497	42.180	23.348	0.440	6.0	0.36	ver
A1	0.307	0.332	0.311	1.601	38.420	27.487	0.490	6.1	0.32	ver

Ap	0.267	0.343	0.349	1.372	44.790	37.818	0.661	6.3	1.05	ver
A1	0.165	0.371	0.420	1.393	43.950	48.347	0.823	6.5	0.82	ver
Ap	0.221	0.363	0.413	1.352	46.020	28.027	0.539	6.4	0.95	ver
A1	0.172	0.341	0.364	1.351	46.060	26.946	0.466	6.5	0.77	ver
Ap	0.215	0.271	0.324	1.318	46.400	30.273	0.532	6.6	1.12	ver
A1	0.191	0.123	0.377	1.300	47.590	24.697	0.467	6.6	1.35	ver
Ap	0.231	0.283	0.390	1.123	54.180	39.237	0.806	6.9	0.79	ver
A1	0.182	0.250	0.288	1.255	48.770	28.805	0.549	6.2	0.85	ver
Ap	0.251	0.275	0.297	1.317	47.530	27.854	0.491	6.9	0.46	ver
A1	0.218	0.324	0.265	1.450	42.330	27.170	0.509	7.0	0.47	ver
Ap	0.272	0.493	0.230	1.165	54.850	13.084	0.377	6.7	0.91	mol
A1	0.391	0.340	0.253	1.260	51.150	15.872	0.382	6.5	0.48	mol
Ap	0.244	0.312	0.461	1.170	54.920	11.558	0.381	5.5	0.95	mol
A1	0.257	0.232	0.387	1.337	48.070	14.739	0.387	5.8	0.51	mol
Ap	0.347	0.342	0.388	1.135	54.430	46.111	1.172	5.4	3.08	mol
A1	0.471	0.348	0.616	1.047	58.120	32.887	0.910	5.5	4.25	mol
Ap	0.377	0.395	0.301	1.105	55.610	16.040	0.403	5.3	3.00	mol
A1	0.186	0.287	0.344	1.152	53.530	22.731	0.495	5.1	2.76	mol
Ap	0.304	0.520	0.303	1.260	52.000	6.713	0.311	6.4	1.15	mol
A1	0.357	0.419	0.373	1.454	44.620	7.009	0.286	7.0	1.18	mol
Ap	0.256	0.307	0.354	1.274	49.460	46.346	1.343	5.4	0.39	ult
A1	0.179	0.337	0.206	1.308	48.310	48.701	1.776	4.9	0.28	ult
Ap	0.297	0.314	0.227	1.312	49.560	60.601	1.613	5.5	0.38	ult
A1	0.260	0.290	0.276	1.445	44.410	46.054	1.256	5.5	0.38	ult
Ap	0.324	0.486	0.229	1.138	54.300	57.621	1.917	4.9	0.30	ult
A1	0.290	0.282	0.392	1.220	50.810	67.293	1.924	5.1	0.28	ult
Ap	0.293	0.285	0.426	1.319	47.050	66.674	2.200	5.1	0.33	ult
A1	0.212	0.228	0.231	1.323	47.830	74.444	2.609	4.9	0.27	ult
Ap	0.343	0.264	0.513	1.351	46.280	53.723	1.239	5.0	0.35	ult
A1	0.300	0.358	0.276	1.404	44.190	53.500	1.304	4.8	0.29	ult;

\*proc print ;

\*run;

**proc glm** data=artic3;

class samp tax;

model IF<sub>2.0-9.49mm</sub> IF<sub>9.50-19.00mm</sub> IF<sub>19.01-35.70mm</sub> =samp|tax Pt Ea /nouni ss3;

manova h=\_ALL\_/printe printh;

title1 ' salida del articulo 3' ;

title2 ' igualdad de promedios de horizontes';

lsmeans samp\*tax;

**run;**

**Tabla 2-E:** Igualdad de promedio de horizontes.

Clases	Niveles	Valores
Horizontes	2	Ap, A1
Taxonomía (orden)	5	Alf, Inc, Mol, Ult, Ver
Número de observaciones	182	

Alfisoles (Alf), Inceptisoles (Inc), Molisoles (Mol), Ultisoles (Ult), Vertisoles (Ver)

**Tabla 3-E:** Manova para el efecto horizonte.

Estadístico	Valor	Cociente F	Grados de libertad del numerador	Grados de libertad del denominador	Pr > F
Wilks' Lambda	0.89900904	6.29	3	168	0.0005
Pillai's Trace	0.10099096	6.29	3	168	0.0005
Hotelling-Lawley Trace	0.11233586	6.29	3	168	0.0005
Roy's Greatest Root	0.11233586	6.29	3	168	0.0005

**Tabla 4-E:** Manova para el efecto taxonomía (orden).

Estadístico	Valor	Cociente F	Grados de libertad del numerador	Grados de libertad del denominador	Pr > F
Wilks' Lambda	0.78842662	3.48	12	444.78	<0.0001
Pillai's Trace	0.22439847	3.44	12	510	<0.0001
Hotelling-Lawley Trace	0.25228683	3.51	12	289.72	<0.0001
Roy's Greatest Root	0.16240575	6.90	4	170	<0.0001

**Tabla 5-E:** Manova para el efecto interacción taxonomía (orden) horizonte.

Estadístico	Valor	Cociente F	Grados de libertad del numerador	Grados de libertad del denominador	Pr > F
Wilks' Lambda	0.94115215	0.86	12	444.78	0.5888
Pillai's Trace	0.05950434	0.86	12	510	0.5882
Hotelling-Lawley Trace	0.06183133	0.86	12	289.72	0.5871
Roy's Greatest Root	0.04796663	2.04	4	170	0.0912

**Tabla 6-E:** Manova para el efecto de la porosidad total (Pt).

Estadístico	Valor	Cociente F	Grados de libertad del numerador	Grados de libertad del denominador	Pr > F
Wilks' Lambda	0.92387036	4.61	3	168	0.0040
Pillai's Trace	0.07612964	4.61	3	168	0.0040
Hotelling-Lawley Trace	0.08240295	4.61	3	168	0.0040
Roy's Greatest Root	0.08240295	4.61	3	168	0.0040

**Tabla 7-E.** Manova para el efecto del estado de agregación (Ea):

Estadístico	Valor	Cociente F	Grados de libertad del numerador	Grados de libertad del denominador	Pr > F
Wilks' Lambda	0.92826399	4.33	3	168	0.0057
Pillai's Trace	0.07173601	4.33	3	168	0.0057
Hotelling-Lawley Trace	0.07727975	4.33	3	168	0.0057
Roy's Greatest Root	0.07727975	4.33	3	168	0.0057

**Tabla 8-E:** Tabla de medias del IF<sub>i</sub> estimadas por mínimos cuadrados para horizonte y taxonomía (orden).

Horizonte	Taxonomía (orden)	IF <sub>i</sub> 2.0-9.49	IF <sub>i</sub> 9.50-19.00	IF <sub>i</sub> 19.01-35.70
A1	Alf	0.27662966	0.32104255	0.39301240
A1	Inc	0.40132669	0.44409007	0.45851738
A1	Mol	0.31599405	0.38057778	0.39025146
A1	Ult	0.30126033	0.31429009	0.35122574
A1	Ver	0.28124823	0.35813907	0.39280662
Ap	Alf	0.35298848	0.38118884	0.50685308
Ap	Inc	0.46144509	0.48979899	0.60748899
Ap	Mol	0.35786185	0.37806979	0.41776559
Ap	Ult	0.36154859	0.37170032	0.37064517
Ap	Ver	0.31172244	0.38950123	0.39505535

Alfisoles (Alf), Inceptisoles (Inc), Molisoles (Mol), Ultisoles (Ult), Vertisoles (Ver)

### Clasificación del diámetro ponderado medio y estado de agregación de los suelos estudiados

**Tabla 9-E:** Clasificación del diámetro ponderado medio (DPM) de los suelos (IGAC, 2006a).

DPM (mm)	Calificación de los suelos de acuerdo al DPM
< 0.5	Inestables
0.5 - 1.5	Ligeramente estables
1.5 - 3.0	Moderadamente estables
3.0 - 5.0	Estables
> 5.0	Muy estables

**Tabla 10-E:** Clasificación del estado de agregación (Ea) de los suelos (IGAC, 2006a).

<b>Porcentaje de agregados &gt; 0.5 mm</b>	<b>Estado de agregación</b>
>90	Muy alto
80 - 90	Alto
35 - 80	Medio
25 - 35	Bajo
< 25	Muy bajo

## Anexo F

### Información complementaria análisis estadístico/matemático artículo 5

#### Friabilidad y su relación con el contenido de agua y el límite plástico en suelos dedicados al cultivo de caña de azúcar

#### *Modelo de superficie para el máximo valor del $IF_i$ en el horizonte Ap en función de retención de agua (RA) y potencial de presión (T)*

*Modelo*

$$IF_i(Ap) = -0.1767 + 0.0017T + 0.0036RA - 3.7826 * 10^{-6} T^2 - 3.3287 * 10^{-6} RAT - 5.027 * 10^{-6} RA^2$$

*Primeras derivadas parciales*

*Respecto a RA*

$$\frac{\partial IF_i(Ap)}{\partial RA} = 0.0036 - 3.3287 * 10^{-6} T - 2 * 5.027 * 10^{-6} RA = 0$$

Multiplicando por  $10^6$ , se tiene:

$$\frac{\partial IF_i(Ap)}{\partial RA} = 3600 - 3.3287T - 10.054RA = 0$$

*Respecto a T*

$$\frac{\partial IF_i(Ap)}{\partial T} = 0.0017 - 2 * 3.7826 * 10^{-6} T - 3.3287 * 10^{-6} RA = 0$$

Multiplicando por  $10^6$ , se tiene:

$$\frac{\partial IF_i(Ap)}{\partial T} = 1700 - 7.5652T - 3.3287RA = 0$$

Sistema de ecuaciones de las primeras derivadas parciales (multiplicadas por 1000000)

$$\begin{cases} 3.3287T + 10.054RA = 3600 \\ 7.5652T + 3.3287RA = 1700 \end{cases}$$

*Solución al sistema/ Valores extremos*

$$RA = 332.04$$

$$T = 78.62$$

*Segundas derivadas parciales*

*Respecto a RA*

$$\frac{\partial IFi^2(Ap)}{\partial RA^2} = -1.0054 * 10^{-5} < 0$$

Respecto a T

$$\frac{\partial IFi^2(Ap)}{\partial T^2} = -7.5652 * 10^{-6} < 0$$

Mixta

$$\frac{\partial IFi^2(Ap)}{\partial RA \partial T} = -3.3287 * 10^{-6}$$

Hessiano

$$H(RA, T) = \begin{vmatrix} -1.0054 * 10^{-5} & -3.3287 * 10^{-6} \\ -3.3287 * 10^{-6} & -7.5652 * 10^{-6} \end{vmatrix} = 7.6060 * 10^{-11} - 1.1080 * 10^{-11} = 6.4980 * 10^{-11} > 0$$

Criterio de maximización

Ya que  $H(RA, T) > 0$  y como  $\frac{\partial IFi^2(Ap)}{\partial RA^2} < 0$ , la función  $IFi(Ap)$  alcanza un máximo en:  
 $(RA, T) = (332.04, 78.62)$  con un valor para el índice de friabilidad  $IFi(Ap) = 0.498$ .

**Modelo de superficie para el máximo valor del IF<sub>i</sub> en el horizonte A1 en función de retención de agua (RA) y potencial de presión (T)**

Modelo

$$IFi(A1) = 0.2255 + 0.0002T + 0.0013RA - 1.1367 * 10^{-6} T^2 - 4.7027 * 10^{-7} RAT - 2.297 * 10^{-6} RA^2$$

Primeras derivadas parciales

Respecto a RA

$$\frac{\partial IFi(A1)}{\partial RA} = 0.0013 - 4.7027 * 10^{-7} T - 4.594 * 10^{-6} RA = 0$$

Respecto a T

$$\frac{\partial IFi(A1)}{\partial T} = 0.0002 - 2 * 1.1367 * 10^{-6} T - 4.7027 * 10^{-7} RA = 0$$

Sistema de ecuaciones de las primeras derivadas parciales

$$\begin{cases} 4.7027 * 10^{-7} T + 4.594 * 10^{-6} RA = 0.0013 \\ 2.2734 * 10^{-6} T + 4.7027 * 10^{-7} RA = 0.0002 \end{cases}$$

Multiplicando por  $10^6$  ambas ecuaciones, se tiene:

$$\begin{cases} 0.47027T + 4.5941RA = 1300 \\ 2.2734T + 0.47027RA = 200 \end{cases}$$

*Solución al sistema/ Valores extremos*

$$RA = 279.89$$

$$T = 30.08$$

*Segundas derivadas parciales*

*Respecto a RA*

$$\frac{\partial IFi^2(AI)}{\partial RA^2} = -4.594 * 10^{-6} < 0$$

*Respecto a T*

$$\frac{\partial IFi^2(AI)}{\partial T^2} = -2.2734 * 10^{-6} < 0$$

*Mixta*

$$\frac{\partial IFi^2(AI)}{\partial RA \partial T} = -2.2734 * 10^{-6}$$

*Hessiano*

$$H(RA, T) = \begin{vmatrix} -4.594 * 10^{-6} & -4.7027 * 10^{-7} \\ -4.7027 * 10^{-7} & -2.2734 * 10^{-6} \end{vmatrix} = -1.044 * 10^{-11} - 2.2115 * 10^{-13} = 1.0218 * 10^{-11} < 0$$

Ya que  $H(RA, T) > 0$  y como  $\frac{\partial IFi^2(AI)}{\partial RA^2} < 0$ , la función  $IFi(AI)$  alcanza un máximo en:

$(RA, T) = (279.89, 30.08)$ , con un valor para el índice de friabilidad  $IFi(AI) = 0.410$ .

De otra parte, para el componente inferencial se utilizó el análisis de correlación canónica (Tabachnick y Fidell, 2007), con el objeto de identificar y cuantificar la asociación entre dos conjuntos de variables: un primer conjunto conformado por el índice de friabilidad en su límite inferior del intervalo de confianza ( $IF_i$ ) y el contenido de agua retenida en los agregados (RA) ( $g\ kg^{-1}$ ) y, un segundo conjunto, conformado por los potenciales de presión (T) (kPa) y el contenido de agua del suelo en el límite plástico (obtenido experimentalmente) ( $g\ kg^{-1}$ ). Las significancias estadísticas presentaron el criterio para la elección de los conjuntos de variables canónicas de utilidad en el proceso de modelado, además, se adjuntó una medida de la varianza muestral explicada por las variables canónicas, la tabla de las correlaciones canónicas y el diagrama de dispersión de las variables canónicas.



## Anexo G

### Remanente de agua de los agregados del suelo luego de secos al aire y en horno a 40°C

**Tabla 1-G:** Remanente de agua de los agregados secados en invernadero durante 5 días a temperatura diurna promedio de 29°C y posteriormente en horno a temperatura constante de 40°C durante 48 horas.

Observación	Horizonte	Agregados entre 2.0 y 4.79 mm Pw (%)	Agregados entre 4.80 y 9.49mm Pw (%)	Agregados entre 9.50 y 19.00mm Pw (%)	Agregados entre 19.01 y 35.70mm Pw (%)
FR-1	Ap	3.43	3.64	3.79	3.69
	A1	3.17	3.35	3.55	3.38
FR-2	Ap	2.88	3.04	4.22	4.01
	A1	3.49	3.70	3.83	3.78
FR-3	Ap	3.04	2.76	3.37	3.76
	A1	2.39	3.37	3.83	4.05
FR-4	Ap	2.88	3.12	3.12	2.96
	A1	2.75	3.05	3.52	3.85
FR-5	Ap	2.65	2.96	3.16	2.89
	A1	2.36	2.77	2.38	3.52
FR-6	Ap	2.45	2.73	2.97	3.28
	A1	2.24	2.71	3.15	3.48
FR-7	Ap	1.53	2.65	2.95	2.96
	A1	2.80	2.63	3.00	3.53
FR-8	Ap	2.56	2.54	3.12	3.18
	A1	2.07	2.24	2.74	2.84
FR-9	Ap	3.50	3.63	3.89	4.64
	A1	3.59	3.58	4.22	4.70
FR-10	Ap	3.33	3.57	3.75	3.76
	A1	2.95	3.14	3.71	3.73
FR-11	Ap	2.77	5.33	4.29	4.25
	A1	2.86	3.08	3.52	3.94
FR-12	Ap	3.16	3.39	4.35	4.36
	A1	3.06	3.25	4.12	4.37
FR-13	Ap	0.63	1.01	1.93	3.77
	A1	2.88	2.86	3.40	3.87
FR-14	Ap	2.22	2.21	3.15	3.13
	A1	2.63	2.13	3.01	3.42
FR-15	Ap	4.18	4.15	4.58	4.70
	A1	3.71	4.02	4.64	4.89
FR-16	Ap	3.54	3.43	3.88	3.84
	A1	3.26	3.51	3.82	4.12
FR-17	Ap	3.95	6.73	7.23	8.12
	A1	3.71	6.92	7.91	8.07

Observación	Horizonte	Agregados entre 2.0 y 4.79 mm	Agregados entre 4.80 y 9.49mm	Agregados entre 9.50 y 19.00mm	Agregados entre 19.01 y 35.70mm
		Pw (%)	Pw (%)	Pw (%)	Pw (%)
FR-18	Ap	5.79	6.31	3.86	7.44
	A1	5.70	6.84	6.81	7.48
FR-19	Ap	2.98	3.30	3.32	3.95
	A1	3.83	3.61	4.12	4.51
FR-20	Ap	3.54	3.61	3.78	3.84
	A1	2.85	2.94	3.30	4.14
FR-21	Ap	4.07	5.23	6.34	7.94
	A1	3.59	5.67	8.02	8.30
FR-22	Ap	2.89	3.19	3.14	3.43
	A1	3.06	2.76	3.20	3.28
FR-23	Ap	2.46	2.10	2.51	2.75
	A1	2.21	2.07	2.38	2.77
FR-24	Ap	2.31	2.31	2.49	2.68
	A1	2.54	2.53	2.62	2.83
FR-25	Ap	2.19	2.03	2.26	2.36
	A1	2.22	2.09	2.31	2.54
FR-26	Ap	2.41	2.21	2.41	2.70
	A1	2.16	2.37	2.81	2.98
FR-27	Ap	2.41	2.40	2.56	2.78
	A1	2.18	2.24	2.33	2.99
FR-28	Ap	3.05	2.90	3.42	3.95
	A1	3.37	3.61	3.66	3.90
FR-29	Ap	3.50	3.57	2.67	3.72
	A1	3.85	3.71	3.87	5.45
FR-30	Ap	2.58	2.89	2.76	3.55
	A1	2.43	2.56	2.74	3.50
FR-31	Ap	3.30	3.56	3.58	4.18
	A1	3.22	2.86	3.28	4.25
FR-32	Ap	2.59	2.74	3.47	4.31
	A1	3.22	3.27	3.47	3.55
FR-33	Ap	3.66	3.05	9.95	6.08
	A1	4.04	4.24	4.77	5.75
FR-34	Ap	3.88	3.78	3.89	5.27
	A1	3.45	3.45	4.47	4.69
FR-35	Ap	3.07	3.41	3.57	3.49
	A1	4.22	3.79	2.97	3.25
FR-36	Ap	5.87	5.81	5.72	5.39
	A1	5.63	5.94	5.96	5.72
FR-37	Ap	4.40	4.12	4.91	5.21
	A1	4.78	4.56	4.79	4.92
FR-38	Ap	4.76	4.89	4.98	5.35
	A1	4.99	4.83	4.87	5.17

Observación	Horizonte	Agregados entre 2.0 y 4.79 mm	Agregados entre 4.80 y 9.49mm	Agregados entre 9.50 y 19.00mm	Agregados entre 19.01 y 35.70mm
		Pw (%)	Pw (%)	Pw (%)	Pw (%)
FR-39	Ap	4.52	4.29	4.40	4.78
	A1	4.41	4.48	5.02	4.96
FR-40	Ap	4.59	4.47	4.72	4.93
	A1	4.88	4.62	4.57	5.29
FR-41	Ap	5.05	4.75	5.11	5.21
	A1	4.35	4.46	4.86	5.11
FR-42	Ap	4.06	4.19	4.82	4.92
	A1	4.48	4.10	4.68	3.67
FR-43	Ap	3.67	3.83	3.95	3.75
	A1	3.99	4.39	4.16	4.34
FR-44	Ap	3.20	3.75	3.61	3.81
	A1	3.46	3.53	3.13	3.29
FR-45	Ap	3.86	4.12	4.04	3.58
	A1	4.02	4.57	3.56	4.02
FR-46	Ap	3.69	3.78	3.61	3.83
	A1	3.55	3.74	3.59	3.85
FR-47	Ap	2.11	2.18	2.18	2.21
	A1	2.00	2.31	2.10	2.23
FR-48	Ap	1.64	1.67	1.59	1.77
	A1	1.31	1.50	1.39	1.27
FR-49	Ap	1.88	2.22	1.91	2.13
	A1	2.11	2.50	1.93	2.25
FR-50	Ap	1.64	1.87	1.69	1.52
	A1	1.51	1.65	1.95	2.10
FR-51	Ap	2.00	1.88	1.92	1.90
	A1	1.88	2.12	2.21	1.99
FR-52	Ap	4.89	4.86	4.92	5.31
	A1	4.52	4.63	4.08	5.26
FR-53	Ap	4.16	4.36	4.30	4.68
	A1	4.63	6.13	4.17	4.62
FR-54	Ap	4.38	4.31	4.56	5.08
	A1	4.42	4.35	4.28	4.89
FR-55	Ap	5.41	5.43	5.72	6.17
	A1	5.48	5.64	5.91	6.42
FR-56	Ap	4.89	5.25	5.50	5.91
	A1	4.99	5.25	5.44	5.78
FR-57	Ap	3.63	3.86	3.79	4.33
	A1	3.87	3.62	3.96	4.44
FR-58	Ap	3.83	4.37	3.86	4.81
	A1	4.48	4.38	4.55	5.11
FR-59	Ap	2.85	2.65	2.88	2.92
	A1	2.69	2.78	2.90	2.95
FR-60	Ap	3.44	3.36	3.62	4.01
	A1	3.61	3.45	3.70	4.12

Observación	Horizonte	Agregados entre 2.0 y 4.79 mm	Agregados entre 4.80 y 9.49mm	Agregados entre 9.50 y 19.00mm	Agregados entre 19.01 y 35.70mm
		Pw (%)	Pw (%)	Pw (%)	Pw (%)
FR-61	Ap	4.20	4.31	4.32	4.64
	A1	3.94	4.06	4.17	4.53
FR-62	Ap	8.06	8.36	8.66	9.12
	A1	7.72	7.95	8.33	9.07
FR-63	Ap	8.16	8.49	8.82	9.45
	A1	7.89	8.52	8.61	10.14
FR-64	Ap	7.12	7.31	7.53	7.96
	A1	6.89	7.58	7.65	8.34
FR-65	Ap	8.05	7.64	8.39	8.93
	A1	6.41	7.49	8.27	8.97
FR-66	Ap	4.41	5.33	6.31	7.17
	A1	3.25	5.05	6.35	6.56
FR-67	Ap	2.28	1.92	2.46	2.97
	A1	2.18	2.03	2.44	2.57
FR-68	Ap	2.49	2.49	3.09	3.34
	A1	2.46	2.22	2.70	3.54
FR-69	Ap	1.41	1.28	1.58	1.86
	A1	1.38	1.31	1.70	1.96
FR-70	Ap	1.43	1.20	1.75	1.92
	A1	1.40	1.34	1.72	2.07
FR-71	Ap	2.93	3.17	4.05	4.13
	A1	3.11	2.60	2.90	4.40
FR-72	Ap	1.81	2.17	2.37	2.71
	A1	1.79	1.59	2.47	2.64
FR-73	Ap	2.26	1.84	2.49	3.83
	A1	1.91	1.91	2.90	3.65
FR-74	Ap	1.91	1.72	2.41	2.86
	A1	2.83	5.22	3.21	3.37
FR-75	Ap	2.10	2.52	2.69	2.85
	A1	2.37	2.46	2.69	2.99
FR-76	Ap	2.40	2.54	2.78	3.04
	A1	2.53	2.25	2.77	2.98
FR-77	Ap	3.36	3.34	4.21	4.62
	A1	3.62	3.49	4.18	4.48
FR-78	Ap	2.73	3.17	4.20	4.57
	A1	3.48	3.11	3.75	4.09
FR-79	Ap	2.60	3.49	4.45	5.10
	A1	3.92	2.82	4.54	5.32
FR-80	Ap	3.93	3.82	4.80	5.15
	A1	5.00	4.00	5.12	5.45
FR-81	Ap	2.73	2.60	4.05	4.47
	A1	2.81	2.76	4.10	4.14

Observación	Horizonte	Agregados entre 2.0 y 4.79 mm	Agregados entre 4.80 y 9.49mm	Agregados entre 9.50 y 19.00mm	Agregados entre 19.01 y 35.70mm
		Pw (%)	Pw (%)	Pw (%)	Pw (%)
FR-82	Ap	0.74	0.47	1.97	2.54
	A1	1.90	0.85	2.27	2.57
FR-83	Ap	1.48	0.98	1.47	2.09
	A1	1.59	0.88	1.29	2.14
FR-84	Ap	3.20	2.89	3.31	3.59
	A1	3.19	3.11	3.56	3.61
FR-85	Ap	2.90	2.70	3.02	3.32
	A1	3.00	2.90	3.35	3.49
FR-86	Ap	1.66	1.70	1.83	1.93
	A1	1.78	1.36	1.83	1.85
FR-87	Ap	2.33	2.87	2.81	2.88
	A1	2.44	2.20	2.56	2.76
FR-88	Ap	2.23	1.86	2.61	2.75
	A1	2.24	2.42	2.59	2.85
FR-89	Ap	2.95	2.82	3.00	3.11
	A1	2.62	2.89	3.02	3.25
FR-90	Ap	1.99	1.99	2.27	2.59
	A1	1.98	1.80	2.07	2.42
FR-91	Ap	1.95	2.01	2.32	2.56
	A1	1.67	1.49	2.67	2.84

## Anexo H

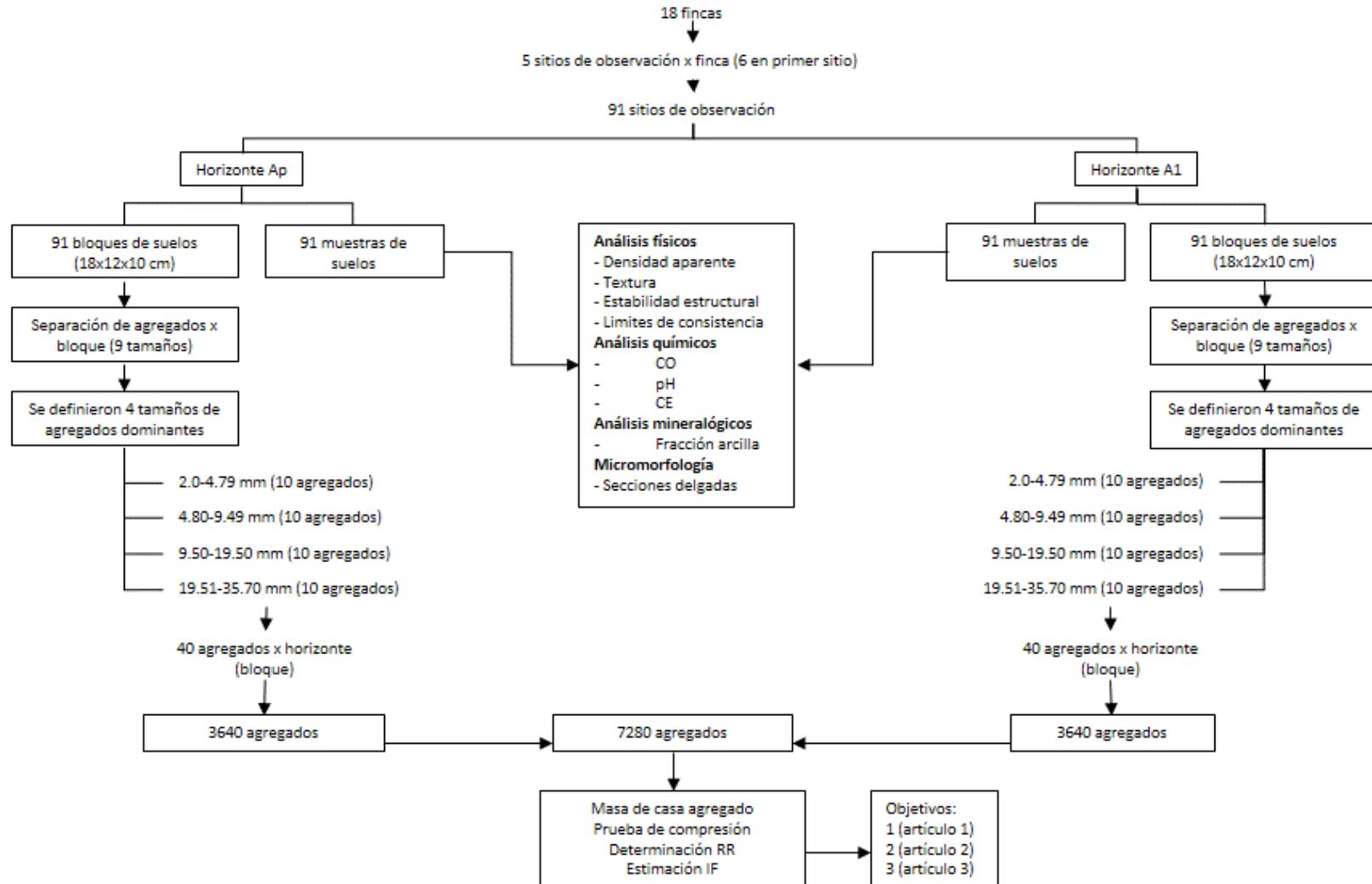
### Principales propiedades y características físicas, químicas y mineralógicas de los suelos estudiados

Finca N°	Tipo de suelo	N° obser Ap/A1	Estruc prim	Text Ap/A1	FAT Ap/A1	FaT Ap/A1	FLT Ap/A1	Da Ap/A1	Pt Ap/A1	Ea Ap/A1	DPM Ap/A1	pH Ap/A1	CO Ap/A1	Ce Ap/A1	Dom. Min. arcilloso Ap/A1
F-1	Udertic	6	bs	Ar	8,24	55,28	36,48	1,19	52,69	81,82	2,90	5,58	24,38	0,35	+++
	Haplustalfs	6	bs	Ar	8,60	62,67	28,73	1,27	49,22	82,92	3,04	5,70	21,87	0,29	+++
F-2	Vertic	5	bs	Ar	16,93	56,64	26,42	1,27	49,65	78,81	3,29	5,41	18,77	1,12	+++
	Endoaqualfs	5	bs	Ar-L	14,74	45,47	39,79	1,27	49,87	75,58	2,98	5,88	18,31	0,43	+++
F-3	Vertic	5	bs	Fr-Ar	23,38	31,32	45,30	1,39	44,89	46,57	1,33	7,76	18,78	1,11	***
	Haplustolls	5	bs	Fr-Ar-A	25,25	34,82	39,93	1,38	45,35	46,03	1,27	7,77	18,34	1,15	***
F-4	Typic	5	bs	Ar	16,21	50,29	33,50	1,35	44,36	57,51	1,50	8,15	23,83	1,51	***
	Calcisterts	5	bs	Ar	14,07	50,50	35,43	1,30	47,04	52,32	1,18	8,38	18,42	1,34	***
F-5	Typic	5	bs	Ar	13,71	56,44	29,85	1,41	43,63	79,72	2,95	4,74	19,69	0,33	+++
	Palehumults	5	bs	Ar	14,16	57,68	28,16	1,44	42,24	75,42	2,48	4,67	18,75	0,34	+++
F-6	Typic	5	bs	Ar	8,45	69,28	22,27	1,42	41,79	82,40	3,16	4,86	23,96	0,39	+++
	Palehumults	5	bs	Ar	7,59	62,37	30,04	1,41	43,01	80,05	3,18	5,28	23,41	0,40	+++
F-7	Vertic	5	ba	Ar	12,66	48,21	39,12	1,44	42,02	75,49	3,00	5,83	19,31	0,57	+++
	Haplustalfs	5	ba	Ar	9,17	50,80	40,03	1,46	41,51	86,05	3,76	5,86	18,06	0,86	+++
F-8	Udertic	5	bs	Ar	3,72	66,34	29,94	1,45	40,91	92,13	4,17	5,11	20,22	0,32	+++
	Haplustalfs	5	bs	Ar	3,49	68,80	27,71	1,46	40,34	90,96	4,54	5,16	17,78	0,58	+++
F-9	Typic	5	bs	Fr-Ar	18,89	31,14	49,97	1,33	47,48	42,04	1,34	7,88	21,88	1,78	***
	Haplustolls	5	bs	Fr-Ar	16,81	31,61	51,57	1,40	44,43	47,48	1,37	7,30	18,43	1,56	***
F-10	Typic	5	bs	Ar	26,01	27,78	46,21	1,32	51,39	17,84	0,45	8,14	12,83	2,69	+++
	Haplustepts	5	bs	Ar	17,45	21,00	61,55	1,46	46,22	13,42	0,39	8,16	11,14	1,47	+++
F-11	Vertic	5	bs	Ar	13,80	43,30	42,90	1,28	49,18	76,93	2,67	6,80	15,77	0,92	***
	Haplustolls	5	bs	Fr-Ar	15,40	42,54	42,06	1,33	46,41	72,27	2,14	6,67	14,46	0,73	***
F-12	Petrocalcic	5	bs	Fr-Ar	18,17	35,56	46,28	1,53	39,50	69,40	2,24	7,00	19,29	1,39	***
	Haplusterts	5	bs	Fr-Ar	22,20	35,79	42,02	1,54	39,43	59,98	1,76	7,45	14,88	1,00	***
F-13	Entic	5	bs	Ar	7,53	64,10	28,36	1,17	49,78	70,61	1,57	5,91	20,03	0,76	***
	Haplusterts	5	bs	Ar	7,77	63,19	29,05	1,23	47,62	66,88	1,35	6,32	18,35	0,61	***
F-14	Entic	5	bs	Fr-Ar-A	29,34	34,08	36,57	1,57	39,02	71,62	2,76	6,32	14,42	0,68	***
	Haplustolls	5	bs	Fr-Ar-A	27,92	36,93	35,16	1,52	41,38	62,12	1,95	6,51	11,80	0,60	***
F-15	Entic	5	bs	Fr-Ar-A	35,34	33,71	30,95	1,48	42,02	28,29	0,59	5,74	10,67	0,46	***
	Haplusterts	5	bs	Fr-Ar-A	31,33	34,02	34,64	1,52	41,02	31,54	0,64	5,81	10,44	0,99	***
F-16	Typic	5	bs	Ar-A	21,94	40,49	37,57	1,29	47,82	32,99	0,61	6,61	15,32	0,89	***
	Endoaquerts	5	bs	Fr-Ar	21,51	38,85	39,64	1,34	45,98	30,94	0,56	6,54	14,47	0,88	***
F-17	Entic	5	bs	Fr-Ar-A	29,77	30,03	40,21	1,17	54,36	17,76	0,51	5,88	15,90	1,74	***
	Haplustolls	5	bs	Fr-Ar-A	30,01	31,41	38,58	1,24	51,57	19,62	0,52	5,96	15,41	2,00	***
F-18	Typic	5	bs	Ar	12,56	49,78	37,66	1,27	49,61	57,09	1,68	5,17	16,28	0,35	+++
	Palehumults	5	bs	Ar	11,30	49,27	39,43	1,33	47,54	59,31	1,84	5,02	15,76	0,29	+++

Estruc. prim.: estructura primaria; Text.:textura; FAT: fracción arena total; FaT: fracción arcilla total; FLT: fracción limo total; Da: densidad aparente; Pt: porosidad total; Ea: estado de agregación; DPM: diámetro ponderado medio; pH: reacción del suelo; CO: carbono orgánico; Ce: conductividad eléctrica; Dom. Min. arcilloso: Dominio mineral arcilloso. +++: dominio de minerales arcillosos tipo 2:1; \*\*\*: dominio de minerales arcillosos tipo 1:1.

## Anexo I

### Diseño del experimento (Parte 1): Agregados secos al aire y en horno a 40°C. Capítulos 2, 3 y 4.



**Diseño del experimento (Parte 2): Agregados con diferentes contenidos de agua (a potenciales de presión de 10, 30, 100 y 300 kPa). Capítulo 5.**

