



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

**Determinación del efecto de diversos sistemas de uso del suelo sobre las propiedades que regulan la oferta hídrica en el piedemonte amazónico y generación de un indicador hídrico potencial.**

**Cesar Alberto Montealegre Gálvez**

**Facultad de Ciencias Agropecuarias  
Escuela de Posgrados  
Universidad Nacional de Colombia  
Sede Palmira**

**2014**

**Determinación del efecto de diversos sistemas de uso del suelo sobre las propiedades que regulan la oferta hídrica en el piedemonte amazónico y generación de un indicador hídrico potencial.**

**Cesar Alberto Montealegre Gálvez**

Ingeniero Agrónomo

**Tesis de Grado como requisito para obtener el título de Magister en Ciencias Agrarias línea de investigación en Suelos**

**Directora Elena Velásquez I. , Ph.D.**

**Facultad de Ciencias Agropecuarias  
Escuela de Posgrados  
Universidad Nacional de Colombia  
Sede Palmira  
2014**

## **ACTA DE SUSTENTACION**

“La Facultad y los jurados de la tesis  
no se harán responsables de las  
ideas emitidas por el autor”

Artículo 24, Resolución 04 de 1974.

# Dedicatoria

A Dios...Por ser la luz, el guía, el compañero que no me deja desfallecer.

A mi bella Caro...por su paciencia, apoyo constante, dedicación y profundo amor, porque a mi lado ha construido un sendero...Por su valentía y por creer en mí.

A mi Pablo...porque es ese ser de luz que mantiene unida nuestra familia.

A mi Madre...por creer siempre en mí y por tenerme cerca de Dios en sus oraciones.

A Francia...mi hermana, una mujer tenaz.

A mi Padre (Q.E.P.D) por su liderazgo, enseñanzas, buen ejemplo y por darme cátedra de vida.

A Chucho (Q.E.P.D) el amigo que nunca me falló...el parcero de bohemia, el hermano.

A mis maestros por su dedicación, enseñanzas y experiencia.

## **Agradecimientos**

Quiero agradecer especialmente a la Doctora Elena Velásquez por su paciencia, dedicación y apoyo constante. Gracias a sus enseñanzas pude hacer realidad este trabajo académico, que de alguna manera representa un sueño para mi futuro profesional.

Al Doctor Patrick Lavelle, por permitirme desarrollar este trabajo en el marco de los proyectos de cooperación que lidera.

A Edgar Rodríguez por las horas que dedicó a practicar conmigo el manejo del programa R y por compartir conmigo su experiencia doctoral, también por compartir en Medellín la experiencia ISCO 2013.

A Miguel Caicedo en el Laboratorio de Física de suelos del CIAT, por sus aportes prácticos, por su preocupación y por compartir en Medellín las experiencias de la Escuela de Física de Suelos 2012.

## Resumen

La región del piedemonte amazónico colombiano ha sufrido un proceso de degradación acelerada de sus recursos naturales producto de la colonización y la expansión de la frontera agropecuaria, generando presiones y daños irreversibles sobre la selva y disminuyendo su potencial para ofrecer servicios ecosistémicos de calidad. Con el objetivo de generar un indicador hídrico potencial de calidad de suelos, se estructuró una investigación que se llevó a cabo en suelos ubicados en el departamento de Caquetá - piedemonte amazónico Colombiano, se seleccionaron 3 Ventanas Paisajísticas (Sistemas de Uso Dominantes): Tradicional, Silvopastoril y Agroforestal, en cada sistema de uso del suelo se seleccionaron nueve (9) fincas y se definieron cinco (5) puntos de muestreo por cada finca cada 200 metros lineales (siguiendo un transepto de 1 km). La altitud de las fincas oscila entre los 900 y 1.100 (m.s.n.m), con un régimen de lluvias unimodal, precipitación media anual de 3.307 mm y temperatura promedio de 25.3 °C. Se realizaron muestreos de suelos en profundidades de 0-40 cm para determinar las variables físicas: textura, densidad aparente, densidad real, porosidad total, humedad gravimétrica, Macroporosidad, Mesoporosidad, microporosidad, conductividad hidráulica, diámetro medio ponderado, resistencia vertical a la penetración y resistencia tangencial al corte. Para el análisis de los datos se realizó un análisis de componentes principales ACP, el cual separó en los componentes 1 y 2 los juegos de variables que tenían mayor significancia en cuanto al impacto sobre los sistemas (ventanas) y usos del suelo. Posteriormente se construyeron subindicadores e indicadores de calidad hídrica del suelo con el objeto de evaluar cómo los cambios en el uso del suelo afectan de manera significativa su capacidad para proveer servicios hídricos de calidad en el piedemonte amazónico.

**Palabras clave:** Servicios Ecosistémicos, Calidad del Suelo, Cambios en el uso del suelo, physical propiedades físicas, indicadores..

## Abstract

The Colombian Amazonian piedmont region has undergone a process of accelerated degradation of natural resources product of colonization and expansion of the agricultural frontier, creating pressure and irreversible damage to the forest and reducing its potential to offer quality ecosystem services. In order to generate a potential water quality indicator of soil, was structured research that was conducted in soils located in the department of Caquetá - Colombian Amazonian piedmont, we selected 3 Windows landscape (Key Systems Use): Traditional, Silvopastoril and Agroforestry in each land use system we selected nine (9) properties and identified five (5) points for each farm sampling every 200 linear meters (following a transept of 1 km). The altitude of the farms between 900 and 1100 (m), with a unimodal rainfall, average annual rainfall of 3,307 mm and average temperature of 25.3 ° C. Soil samples were taken at depths of 0-40 cm to determine the physical variables: texture, bulk density, particle density, total porosity, gravimetric moisture, macroporosity, mesoporosity, microporosity, hydraulic conductivity, mean weight diameter, vertical resistance to penetration and tangential shear resistance. For analysis of data, a principal component analysis PCA, this separated into the components 1 and 2 sets of variables that had the greatest significance in the impact on systems (windows) and land. Subsequently, sub-indicators and indicators constructed soil water quality in order to assess how changes in land use significantly affect its ability to provide quality water services in the Amazon piedmont.

**KEYWORDS:** ecosystem services, soil quality, changes in land use, physical properties, indicators.

# Contenido

|  |             |
|--|-------------|
| <b>Resumen .....</b>   | <b>VII</b>  |
| <b>Abstract.....</b>   | <b>VIII</b> |
| <b>Introducción .....</b>  | <b>1</b>    |
| <b>1. Objetivos.....</b>   | <b>4</b>    |
| <b>Capítulo 1.....</b>   | <b>5</b>    |
| <b>Marco de Referencia.....</b>                                    | <b>5</b>    |
| <b>2. Marco de Referencia.....</b>                                 | <b>6</b>    |
| 2.1. Degradación del recurso suelo .....                           | 6           |
| 2.2. Índices de sostenibilidad .....                               | 7           |
| 2.3. Servicios ecosistémicos .....                                 | 11          |
| 2.3.1. Funciones y Servicios Ecosistémicos del Suelo .....         | 14          |
| 2.4. Calidad del suelo.....  | 16          |
| 2.4.1. Evaluación de la Calidad del suelo .....                    | 19          |
| 2.4.2. Indicadores de Calidad del suelo .....                      | 21          |
| 2.4.3. Indicadores Físicos del Suelo .....                         | 21          |
| 2.5. Características Mecánicas del suelo .....                     | 23          |
| 2.6. Características Hidrológicas del suelo.....                   | 23          |
| 2.6.1. Características Térmicas.....                               | 23          |
| 2.7. Propiedades físicas del suelo .....                           | 24          |
| 2.7.1. Textura del Suelo .....                                     | 24          |
| 2.7.2. Estructura del Suelo .....                                  | 26          |
| 2.7.3. Estabilidad de Agregados .....                              | 27          |
| 2.7.4. Densidad Aparente.....                                      | 28          |
| 2.7.5. Porosidad.....  | 29          |
| 2.7.6. Humedad .....   | 30          |
| 2.7.7. Curva de retención de humedad del suelo .....               | 31          |
| 2.7.8. Infiltración .....  | 32          |
| 2.7.9. Conductividad Hidráulica del suelo .....                    | 33          |
| <b>Capítulo 2.....</b>   | <b>35</b>   |
| <b>3. Materiales y Métodos .....</b>                               | <b>36</b>   |
| 3.1. Descripción de la zona de estudio.....                        | 36          |
| 3.1.1. Ubicación y Aspectos Generales .....                        | 36          |
| 3.1.2. Descripción de los suelos del piedemonte amazónico.....     | 40          |
| 3.1.3. Selección de las Ventanas (sistemas) y Usos del Suelo. .... | 41          |
| ▪ <b>3.1.3.1. Sistema de Ganadería Tradicional “CTR”:</b> .....    | <b>43</b>   |
| ▪ <b>3.1.3.2. Sistema Silvopastoril “CSP”:</b> .....               | <b>43</b>   |

|  |           |
|--|-----------|
| ▪ 3.1.3.3. Sistema Agroforestal “CAF”:   | 43        |
| 3.2. Variables asociadas a propiedades físicas   | 47        |
| 3.3. Procesamiento estadístico y análisis de datos   | 47        |
| <b>Capítulo 3</b>  | <b>51</b> |
| <b>Resultados</b>  | <b>52</b> |
| 4.1. Análisis de la Etapa 1-A  | 53        |
| 4.1.1. Análisis de componentes principales ACP (Etapa 1-A: 135 puntos 0-10 cm y 9 variables)               | 53        |
| 4.1.2. Análisis de las Propiedades Físicas Mecánicas   | 56        |
| ▪ 4.1.2.1. Densidad Aparente   | 56        |
| ▪ 4.1.2.2. Resistencia Tangencial al Corte   | 57        |
| ▪ 4.1.2.3. Resistencia Vertical a la Penetración   | 58        |
| 4.1.3. Análisis de las Propiedades Físicas Volumétricas  | 59        |
| ▪ 4.1.3.1. Porosidad Total   | 59        |
| ▪ 4.1.3.2. Humedad Gravimétrica  | 61        |
| ▪ 4.1.3.3. Densidad Real   | 62        |
| 4.1.4. Análisis de las Propiedades Físicas Estructurales   | 63        |
| ▪ 4.1.4.1. Textura   | 63        |
| ▪ 4.1.4.2. Estabilidad de Agregados  | 67        |
| 4.2. Análisis de la Etapa 1-B  | 72        |
| 4.2.1. Análisis de componentes principales ACP (Etapa 1-B: 27 puntos 0-10 cm y 9 variables)                | 73        |
| 4.2.2. Análisis de las Propiedades Físicas Mecánicas   | 76        |
| ▪ 4.2.2.1. Densidad Aparente   | 76        |
| ▪ 4.2.2.2. Resistencia Tangencial al Corte   | 77        |
| ▪ 4.2.2.3. Resistencia Vertical a la Penetración   | 78        |
| 4.2.3. Análisis de las Propiedades Físicas Volumétricas  | 79        |
| ▪ 4.2.3.1. Porosidad Total   | 79        |
| ▪ 4.2.3.2. Humedad   | 81        |
| ▪ 4.2.3.3. Densidad Real   | 82        |
| 4.2.4. Análisis de las Propiedades Físicas Estructurales   | 83        |
| ▪ 4.2.4.1. Textura   | 83        |
| ▪ 4.2.4.2. Estabilidad de Agregados 0.125-1 mm   | 87        |
| ▪ 4.2.4.3. Estabilidad de Agregados 1 - 2 mm   | 88        |
| ▪ 4.2.4.4. Estabilidad de Agregados 2 - 4 mm   | 89        |
| ▪ 4.2.4.5. Estabilidad de Agregados 4 - 6 mm   | 90        |
| ▪ 4.2.4.6. Estabilidad de Agregados > 6 mm   | 91        |
| ▪ 4.2.4.6. Diámetro Medio Ponderado  | 92        |
| 4.3. Análisis de la Etapa 2-A  | 93        |
| 4.3.1. Análisis de componentes principales ACP (Etapa 2-A: 27 puntos 0-10, 10-15 y 20-40 cm y 7 variables) | 93        |
| 4.3.2. Análisis de las Propiedades Físicas Mecánicas   | 96        |
| ▪ 4.3.2.1. Densidad Aparente   | 96        |
| ▪ 4.3.2.2. Resistencia Tangencial al Corte   | 99        |
| 4.3.3. Análisis de las Propiedades Físicas Volumétricas  | 100       |
| ▪ 4.3.3.1. Porosidad Total   | 100       |

---

|   |            |
|---|------------|
| ▪ 4.3.3.2. <b>Humedad Gravimétrica</b> .....  | 103        |
| ▪ 4.3.3.3. <b>Macroporosidad</b> .....  | 105        |
| ▪ 4.3.3.4. <b>Microporosidad</b> .....  | 106        |
| 4.4. Análisis de la Etapa 2-B.....  | 110        |
| 4.4.1. Análisis de Componentes Principales ACP (Etapa 2-B: 27 puntos 0-10 cm y 7 variables) ..... | 110        |
| 4.4.2. Análisis de las Propiedades Físicas Mecánicas.....   | 113        |
| ▪ 4.4.2.1. <b>Densidad Aparente</b> .....   | 113        |
| ▪ 4.4.2.2. <b>Resistencia Tangencial al Corte</b> .....   | 114        |
| 4.4.3. Análisis de las Propiedades Físicas Volumétricas .....                                     | 115        |
| ▪ 4.4.3.1. <b>Porosidad Total</b> .....   | 115        |
| ▪ 4.4.3.2. <b>Humedad Gravimétrica</b> .....  | 117        |
| ▪ 4.4.3.3. <b>Macroporosidad</b> .....  | 118        |
| ▪ 4.4.3.4. <b>Microporosidad</b> .....  | 119        |
| ▪ 4.4.3.5. <b>Conductividad Hidráulica</b> .....  | 120        |
| <b>Capítulo 4</b> .....   | <b>122</b> |
| <b>5. Construcción de los indicadores de calidad del suelo en cada etapa.</b> .....               | <b>123</b> |
| <b>6. Discusión</b> .....   | <b>134</b> |
| <b>Capítulo 5</b> .....   | <b>141</b> |
| <b>7. Conclusiones</b> .....  | <b>142</b> |
| <b>8. Bibliografía</b> .....  | <b>144</b> |
| <b>Anexos</b> .....   | <b>150</b> |

## Lista de Figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 1. Factores que afectan la selección del índice de sostenibilidad.....   | 9  |
| Figura 2. Componentes de la Sostenibilidad .....  | 11 |
| Figura 3. Servicios de los ecosistemas. ....  | 13 |
| Figura 4. Marco conceptual de la evaluación de los ecosistemas del milenio. ....  | 14 |
| Figura 5. Principales componentes de la calidad del suelo (Doran y Parking, 1994).<br>.....   | 18 |
| Figura 6. Posibles tendencias de la evaluación de la calidad del suelo (adaptado de Seybold et al., 1998. Citado por Jiménez Ballesta y González Quiñones., 2006).<br>..... | 20 |
| Figura 7. Propiedades físicas e hidrológicas y procesos relacionados con la calidad y la sostenibilidad del suelo (Tomado de: Lal, 1994).....                               | 22 |
| Figura 8. Triángulo para determinar la textura del suelo (Tomado de: Field book for describing and sampling soils, 2012). ....  | 25 |
| Figura 9. Ejemplo de los tipos de estructura del suelo (Tomado de: Field book for describing and sampling soils, 2012). ....  | 27 |
| Figura 10. División Político – Administrativa del Departamento de Caquetá, Colombia – Sur América.....  | 36 |
| Figura 11. Descripción general de la metodología empleada en el trabajo de campo.<br>.....  | 42 |
| Figura 11a.....   | 42 |
| Figura 12. Ventanas paisajísticas y usos del suelo evaluados.....   | 44 |
| Figura 13. Análisis de Componentes Principales ACP, Correlación de Variables y valor de la explicación de los Factores 1 y 2. ....  | 54 |
| Figura 14. Análisis de componentes principales (a) distribución por ventanas paisajísticas (Sistemas) y (b) usos del suelo.....   | 55 |
| Figura 15. Cambios en la Densidad Aparente en ventanas paisajísticas y usos del suelo.....  | 57 |
| Figura 16. Cambios en la Resistencia Tangencial al Corte RTc del suelo en diferentes ventanas paisajísticas y usos. ....  | 58 |
| Figura 17. Cambios en la Resistencia Vertical a la Penetración RVP del suelo en diferentes ventanas paisajísticas y usos. ....  | 59 |
| Figura 18. Cambios en la Porosidad Total del suelo en diferentes ventanas paisajísticas y usos.....   | 61 |
| Figura 19. Cambios en la Humedad Gravimétrica del suelo en diferentes ventanas paisajísticas y usos.....  | 62 |
| Figura 20. Cambios en la Densidad Real del suelo en diferentes ventanas paisajísticas y usos.....   | 63 |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Figura 21. Cambios en el Contenido de Arena (A%) en el suelo en diferentes ventanas paisajísticas y usos.....</b>                      | <b>65</b> |
| <b>Figura 22. Cambios en los Contenidos de Limo (L%) del suelo en diferentes ventanas paisajísticas y usos.....</b>                       | <b>66</b> |
| <b>Figura 23. Cambios en el Contenido de Arcilla del suelo en diferentes ventanas paisajísticas y usos.....</b>                           | <b>67</b> |
| <b>Figura 24. Cambios en los Agregados Estables del suelo (0.125 – 1 mm) en diferentes ventanas paisajísticas y usos. ....</b>            | <b>68</b> |
| <b>Figura 25. Cambios en los Agregados Estables (1 - 2 mm) en diferentes ventanas paisajísticas y usos del suelo.....</b>                 | <b>69</b> |
| <b>Figura 26. Cambios en los Agregados Estables del suelo (2 - 4 mm) en diferentes ventanas paisajísticas. ....</b>                       | <b>70</b> |
| <b>Figura 27. Cambios en los Agregados Estables del suelo 4 - 6 mm en diferentes ventanas paisajísticas y usos.....</b>                   | <b>71</b> |
| <b>Figura 28. Cambios en los Agregados Estables del suelo (&gt; 6 mm) en diferentes ventanas paisajísticas y usos.....</b>                | <b>72</b> |
| <b>Figura 29. Análisis de Componentes Principales ACP, Correlación de Variables y valor de la explicación de los Factores 1 y 2. ....</b> | <b>74</b> |
| <b>Figura 30. Análisis de componentes principales (a) distribución por ventanas paisajísticas (Sistemas) y (b) usos del suelo.....</b>    | <b>75</b> |
| <b>Figura 31. Cambios en la Densidad Aparente en ventanas paisajísticas y usos del suelo.....</b>   | <b>77</b> |
| <b>Figura 32. Cambios en la Resistencia Tangencial al Corte en ventanas paisajísticas y usos del suelo.....</b>                           | <b>78</b> |
| <b>Figura 33. Cambios en la Resistencia Tangencial al Corte en ventanas paisajísticas y usos del suelo.....</b>                           | <b>79</b> |
| <b>Figura 34. Cambios en la Porosidad Total en ventanas paisajísticas y usos del suelo.....</b>   | <b>80</b> |
| <b>Figura 35. Cambios en la Humedad en ventanas paisajísticas y usos del suelo. ....</b>  | <b>81</b> |
| <b>Figura 36. Cambios en la Densidad Real en ventanas paisajísticas y usos del suelo. ....</b>  | <b>82</b> |
| <b>Figura 37. Cambios en el contenido de Arena en ventanas paisajísticas y usos del suelo.....</b>  | <b>84</b> |
| <b>Figura 38. Cambios en el contenido de Limo en ventanas paisajísticas y usos del suelo.....</b>   | <b>85</b> |
| <b>Figura 39. Cambios en el contenido de Arcilla en ventanas paisajísticas y usos del suelo.....</b>                                      | <b>86</b> |
| <b>Figura 40. Cambios en los Agregados Estables (0.125-1 mm) en ventanas paisajísticas y usos del suelo.....</b>                          | <b>87</b> |
| <b>Figura 41. Cambios en los Agregados Estables (1 - 2 mm) en ventanas paisajísticas y usos del suelo.....</b>                            | <b>88</b> |
| <b>Figura 42. Cambios en los Agregados Estables (2 - 4 mm) en ventanas paisajísticas y usos del suelo.....</b>                            | <b>89</b> |

---

|  |            |
|--|------------|
| <b>Figura 43. Cambios en los Agregados Estables (4 - 6 mm) en ventanas paisajísticas y usos del suelo.....</b>   | <b>90</b>  |
| <b>Figura 44. Cambios en los Agregados Estables (6 mm) en ventanas paisajísticas y usos del suelo.....</b>   | <b>91</b>  |
| <b>Figura 45. Cambios en el Diámetro Medio Ponderado en ventanas paisajísticas y usos del suelo.....</b>   | <b>92</b>  |
| <b>Figura 46. Análisis de Componentes Principales ACP Correlación de Variables y valor de la explicación de los Factores 1 y 2. ....</b>                   | <b>94</b>  |
| <b>Figura 47. Análisis de componentes principales distribución por (a) profundidades, (b) ventanas paisajísticas (Sistemas) y (c) usos del suelo. ....</b> | <b>96</b>  |
| <b>Figura 48. Cambios en la Densidad Aparente en (a) profundidades, (b) ventanas paisajísticas (Sistemas) y (c) usos del suelo.....</b>                    | <b>98</b>  |
| <b>Figura 49. Cambios en la Resistencia Tangencial al Corte en diferentes profundidades, ventanas paisajísticas y usos del suelo. ....</b>                 | <b>99</b>  |
| <b>Figura 50. Cambios en la Porosidad Total en diferentes profundidades, ventanas paisajísticas y usos del suelo.....</b>                                  | <b>103</b> |
| <b>Figura 51. Cambios en la Humedad Gravimétrica en diferentes profundidades, ventanas paisajísticas y usos del suelo. ....</b>                            | <b>104</b> |
| <b>Figura 52. Cambios en la Macroporosidad en diferentes profundidades, ventanas paisajísticas y usos del suelo.....</b>                                   | <b>106</b> |
| <b>Figura 53. Cambios en la Microporosidad en diferentes profundidades, ventanas paisajísticas y usos del suelo.....</b>                                   | <b>107</b> |
| <b>Figura 54. Cambios en la Conductividad Hidráulica en diferentes profundidades, ventanas paisajísticas y usos.....</b>                                   | <b>109</b> |
| <b>Figura 55. Análisis de Componentes Principales ACP Correlación de Variables y valor de la explicación de los Factores 1 y 2. ....</b>                   | <b>111</b> |
| <b>Figura 56. Análisis de componentes principales distribución por (a) Ventanas Paisajísticas (Sistemas) y Usos del Suelo. ....</b>                        | <b>112</b> |
| <b>Figura 57. Cambios en la Densidad Aparente en diferentes ventanas paisajísticas y usos del Suelo. ....</b>  | <b>113</b> |
| <b>Figura 58. Cambios en la Resistencia Tangencial al Corte en diferentes ventanas paisajísticas y usos del Suelo. ....</b>                                | <b>114</b> |
| <b>Figura 59. Cambios en la Porosidad Total en diferentes ventanas paisajísticas y usos del Suelo. ....</b>  | <b>116</b> |
| <b>Figura 60. Cambios en la Humedad Gravimétrica en diferentes ventanas paisajísticas y usos del Suelo. ....</b>   | <b>117</b> |
| <b>Figura 61. Cambios en la Macroporosidad en diferentes ventanas paisajísticas y usos del Suelo. ....</b>   | <b>119</b> |
| <b>Figura 62. Cambios en la Microporosidad en diferentes ventanas paisajísticas y usos del Suelo. ....</b>   | <b>120</b> |
| <b>Figura 63. Cambios en la Conductividad Hidráulica en diferentes ventanas paisajísticas y usos del Suelo. ....</b>                                       | <b>121</b> |

## Lista de Fotografías

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Fotografía 1. Sistemas de Uso del suelo en el piedemonte amazónico: A. Sistema Tradicional, B. Sistema Silvopastoril y C. Sistema Agroforestal (Fuente: Pilar Hurtado, 2011).....</b> | <b>40</b> |
| <b>Fotografía 2. Uso de suelo pasto limpio PL (Fuente: Pilar Hurtado, 2011). .....</b>   | <b>45</b> |
| <b>Fotografía 3. Uso de suelo pasto con árboles dispersos PAD. (Fuente: Pilar Hurtado, 2011).....</b>  | <b>45</b> |
| <b>Fotografía 4.. Uso de suelo pasto con leñosas PLÑ (Fuente: Pilar Hurtado, 2011). 46</b>   | <b>46</b> |
| <b>Fotografía 5. Uso de suelo barbecho viejo RV (Fuente: Pilar Hurtado, 2011).....</b>   | <b>46</b> |
| <b>Fotografía 6. Uso de suelo agroforestal PA (Fuente: Pilar Hurtado, 2011). .....</b>   | <b>46</b> |

## Lista de Tablas

|  | Pág |
|--|-----|
| Tabla 1. Propiedades Físicas (Mecánicas) del suelo: D. Aparente ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ ), RTC (kPa) y RVP ( $\text{Kgf}/\text{cm}^2$ ). .....   | 56  |
| Tabla 2. Propiedades Físicas (Volumétricas) del suelo: Porosidad Total (%), Humedad (%) y D. Real ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ ).....   | 60  |
| Tabla 3. Propiedades Físicas (Estructurales) del suelo: Textura (%A-L-Ar), Estabilidad de Agregados (mm) y Diámetro Medio Ponderado (%). .....   | 64  |
| Tabla 4. Propiedades Físicas (Mecánicas) del suelo: D. Aparente ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ ), RTC (kPa) y RVP ( $\text{Kgf}/\text{cm}^2$ ). .....   | 76  |
| Tabla 5. Propiedades Físicas (Volumétricas) del suelo: Porosidad Total (%), Humedad (%) y D. Real ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ ).....   | 80  |
| Tabla 6. Propiedades Físicas (Estructurales) del suelo: Textura (%A-L-Ar), Estabilidad de Agregados (mm) y Diámetro Medio Ponderado (%). .....   | 84  |
| Tabla 7. Propiedades Físicas (Mecánicas) del suelo: D. Aparente ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ ) y RTC (kPa). .....   | 97  |
| Tabla 8. Propiedades Físicas (Volumétricas) del suelo: Porosidad Total (%), Humedad Gravimétrica (%), Macroporos (%), Mesoporos (%), Microporos (%) y Conductividad Hidráulica (cm/h). ..... | 100 |
| Tabla 9. Propiedades Físicas (Mecánicas) del suelo: D. Aparente ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ ) y RTC (kPa). .....   | 113 |
| Tabla 10. Propiedades Físicas (Volumétricas) del suelo: Porosidad Total (%), Humedad Gravimétrica (%), Macroporosidad (%), Microporosidad (%), Conductividad Hidráulica (cm/h). .....        | 116 |
| Tabla 11. Variables utilizadas en el análisis para la construcción de los indicadores. ....  | 123 |
| Tabla 12. Contribución de los factores 1 y 2 e inercia total en ACP de las diferentes variables del suelo en la Etapa 1. ....  | 124 |
| Tabla 13. Contribución de los factores 1 y 2 e inercia total en ACP de las diferentes variables del suelo en la Etapa 2. ....  | 125 |
| Tabla 14. Valores originales de las variables en cada sitio de muestreo. ....  | 126 |
| Tabla 15. Valores reducidos de las variables en cada sitio de muestreo. ....   | 127 |
| Tabla 16. Multiplicación de cada variable reducida por su contribución al Factor 1. ....   | 128 |
| Tabla 17. Multiplicación de cada variable reducida por su contribución al Factor 2. ....   | 128 |
| Tabla 18. Suma de los valores de las variables multiplicadas por su aporte a los factores 1 y 2. ....  | 129 |
| Tabla 19. Indicadores de calidad del suelo Etapas 1 – A, 1 – B y 2-A, 2-B. ....  | 130 |

## Introducción

En Colombia, los cambios en el uso del suelo son generalizados en la mayoría de las regiones productivas del País. Esta situación se evidencia en el conflicto existente entre la vocación del suelo y su uso actual. Lo anterior, sumado a los procesos de colonización y expansión agresiva de la frontera agrícola, ha traído consigo transformaciones en los ecosistemas originarios de las regiones, entre ellas, el piedemonte amazónico<sup>1</sup>. Estos procesos intervienen de manera directa en la disminución y/o pérdida de la biodiversidad, generando entre otros procesos: *Degradación de suelos, disminución de bienes y servicios ambientales, alteración en la dinámica de la regulación hídrica, déficit en el suministro de agua superficial para el consumo humano y las labores productivas, alteración natural del control de plagas y enfermedades, protección de suelos y almacenamiento de carbono, entre otros factores.*

La situación ambiental en la Región Amazónica, es el resultado de la interacción de un conjunto de fuerzas motrices socio-demográficas, económicas, político-institucionales y científico-tecnológicas, así como de las presiones que, estrechamente combinadas, promueven el cambio del uso del suelo. Dicho conjunto de fuerzas motrices establece procesos que condicionan los cambios en

---

<sup>1</sup> El proceso de ocupación del territorio en la gran región amazónica no ha sido ajeno a las dinámicas socioeconómicas a lo largo de la historia. La percepción de la Amazonía como un espacio vacío con grandes riquezas y oportunidades para el desarrollo de variadas actividades económicas, incentivó procesos de ocupación que no tomaron en cuenta la interacción con las culturas nativas ni con los ecosistemas frágiles. Por ello, hoy llama la atención y preocupa el acelerado cambio de uso del suelo, principalmente la pérdida significativa del bosque. En: Dinámicas en la Amazonía. Consultado en: <http://cdam.minam.gob.pe/novedades/geocap2.pdf>. Mayo 17 de 2011.

---

los patrones de uso de los recursos naturales y consecuentes impactos ambientales. Las presiones son factores que afectan directamente a los servicios ecosistémicos. Por ello, es importante analizar las características de las mencionadas fuerzas y su vinculación con el funcionamiento del ecosistema amazónico<sup>2</sup>. En tanto que, la Amazonia no constituye una región homogénea; las dinámicas sociales, económicas y ambientales difieren ampliamente entre las diferentes subregiones que la componen, y que socialmente se han ido conformando y transformando, en medio de dinámicas diferenciales generadas por factores internos y externos del país. Se identifican cuatro subregiones amazónicas: *en el occidente, Caquetá y Putumayo conforman el piedemonte colonizado; Guaviare y los municipios del sur del Meta la subregión norte; Guainía y Vaupés la subregión nororiental; y el departamento de Amazonas la subregión sur.*<sup>3</sup>

El conocimiento de los servicios hidrológicos del suelo amazónico, posibilita la construcción de un indicador de calidad, que genere alternativas para el manejo racional del suelo y el agua en este tipo de ecosistemas frágiles, donde los sistemas productivos imperantes, afectan directamente el recurso hídrico como agente dinámico, que contribuye con la aceleración de los procesos de degradación, al incrementar los fenómenos erosivos, la alteración del ciclo hidrológico (desbalance entre la oferta y demanda de agua), la disminución de los caudales disponibles del Río Amazonas y sus principales tributarios y la alta sedimentación de la Cuenca, que imposibilita el suministro adecuado de agua superficial para el consumo humano y las actividades productivas en las poblaciones cercanas.

---

<sup>2</sup>Ídem, Pág. 66.

<sup>3</sup>[http://www.cepal.org/colombia/noticias/paginas/6/44936/Folleto\\_Amazonia\\_Posible\\_y\\_Sostenible.pdf](http://www.cepal.org/colombia/noticias/paginas/6/44936/Folleto_Amazonia_Posible_y_Sostenible.pdf) Consultado el 8 de febrero de 2013. 7:34 p.m.

---

Así mismo, la evaluación de la calidad del suelo mediante parámetros físicos, químicos y biológicos, posibilita el uso de herramientas integrales que contribuyen a la construcción de una visión detallada del suelo, comparando diversos sistemas de manejo, con el fin de establecer su incidencia en la estabilidad de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos de la Región del Amazonas, como un aporte para la construcción de indicadores de sostenibilidad y uso de los recursos naturales. El presente trabajo pretende analizar cómo los cambios en el uso del suelo afectan de manera significativa su capacidad para proveer servicios hídricos de calidad en el piedemonte amazónico colombiano.

# 1. Objetivos

## Objetivo General

Evaluar los patrones del comportamiento del agua en el suelo bajo diferentes sistemas productivos (Tradicional, Silvopastoril y Agroforestal) en el piedemonte amazónico (Departamento de Caquetá) y el impacto de los cambios de uso sobre la degradación de los suelos.

## Objetivos Específicos

- Determinar la influencia de los diversos usos del suelo en la calidad y disponibilidad de los servicios hídricos en el Piedemonte amazónico.
- Construir un indicador general de la calidad hídrica del suelo, que posibilite la generación de diversas alternativas de manejo sostenible.

## Organización de la tesis

El documento está dividido en 5 capítulos. En el capítulo 1, se presenta el marco de referencia. El capítulo 2 presenta los materiales y métodos. El capítulo 3 comprende el desarrollo específico del tema de investigación, es decir, los resultados y discusión. El capítulo 4 comprende la construcción de los sub-indicadores y el indicador de calidad hídrica del suelo y el capítulo 5 comprende las conclusiones, recomendaciones y referencias bibliográficas

## **Capítulo 1.**

### **Marco de Referencia**

---

## 2. Marco de Referencia

### 2.1. Degradación del recurso suelo

La degradación del recurso suelo es uno de los principales problemas relacionados con la agricultura (disminución en productividad y en calidad) y con el medio ambiente (pérdida de la capacidad regulatoria). La trascendencia del deterioro del recurso suelo radica en que tiene un fuerte impacto en puntos críticos como la seguridad alimentaria, la disminución de la cantidad y de la calidad del recurso agua, la pérdida de biodiversidad y el cambio climático global (**Rivera, 2008**).

Los recursos suelo y agua del trópico se encuentran presionados y propensos a la degradación debido a un medio ambiente agresivo, suelos frágiles ubicados en ecorregiones ecológicamente sensibles, alta presión demográfica, diferentes demandas sobre sus recursos limitantes, productores de escasos recursos y un soporte institucional limitado o ausente. Por ello existe una creciente preocupación por la sostenibilidad de los recursos suelo y agua en términos de la capacidad de resistencia y existencia de estos recursos para demandas futuras (**Lal, 1994**<sup>4</sup>).

La degradación del suelo representa una disminución de la habilidad de un ecosistema o paisaje para soportar las funciones o servicios requeridos para el mantenimiento del sustento (**Rivera, 2008**<sup>5</sup>). Cuando la agricultura es introducida

---

<sup>4</sup> Lal, Rattan. 1994. Métodos y normas para evaluar el uso sostenible de los recursos suelo y agua en el trópico. Servicio de apoyo para el manejo del suelo. Servicio de conservación del suelo (USDA). Agencia americana para el desarrollo internacional. SMSS Monografía técnica No.21. Corpoica - Regional seis. El Espinal Tolima. 96 Pp.

<sup>5</sup> Rivera Peña, Mariela. 2008. Determinación de la Dinámica del Agua en el Sistema Agroforestal Quesungual e Identificación de Factores Suelo-Planta para el mejoramiento de la Productividad

en un lugar de vegetación natural y es intensificada para maximizar los rendimientos, los agricultores simplifican la estructura de los ecosistemas, limitando la variedad de la vegetación. Cada cambio de la vegetación inmediatamente afecta el uso del agua y su ciclo en el paisaje, que resulta en la pérdida de la biodiversidad y en un desarrollo menos complejo de la red de interrelaciones que ocurren naturalmente. Con el tiempo, la producción agrícola continúa particularmente en tierras marginales frágiles, lo cual resulta en la degradación de la base de los recursos naturales, con un creciente impacto en el recurso agua (Rivera, 2008).

## 2.2 Índices de sostenibilidad

De acuerdo con Lal, 1994. El concepto de sostenibilidad es de gran relevancia y utilidad pero necesita volverse cuantitativo, objetivo y confiable. Es necesario desarrollar criterios y métodos que permitan medir cuantitativamente el uso sostenible de los recursos suelo y agua (Figura 1). Para hacer esto es preciso:

- a) Identificar indicadores<sup>6</sup> de sostenibilidad del suelo y agua;
- b) Establecer relaciones cuantitativas entre indicadores de suelo y agua y procesos de degradación modificadora del suelo por una parte y por la otra entre los indicadores y la productividad;

---

del Agua en los Cultivos. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Colombia – Sede Palmira. Escuela de Posgrados. Facultad de Ciencias Agrarias. Pp.28-29.

<sup>6</sup> Un indicador es una variable que resume o simplifica información relevante haciendo que un fenómeno o condición de interés se haga perceptible y que cuantifica, mide y comunica, en forma comprensible, información relevante. Los indicadores deben ser preferiblemente variables cuantitativas, aunque pueden ser cualitativas o nominales o de rango u ordinales, especialmente cuando no hay disponibilidad de información cuantitativa, o el atributo no es cuantificable, o cuando los costos para cuantificar son demasiado elevados. Las principales funciones de los indicadores son: evaluar condiciones o tendencias, comparar transversalmente sitios o situaciones, para evaluar metas y objetivos, proveer información preventiva temprana y anticipar condiciones y tendencias futuras. Cantú, MP; A Becker, JC Bedano & HF Schiavo. 2007. Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices. Ciencia del Suelo 25(2):173-178.

- c) Definir los límites críticos de los indicadores de suelo y agua en relación con el valor del umbral después del cuál la productividad declina de una manera rápida y severa y los recursos suelo y agua están tan degradados que es imposible recuperarlos;
- d) Establecer índices de sostenibilidad<sup>7</sup> y calidad del suelo y,
- e) Desarrollar métodos estandarizados para determinar indicadores de suelo y agua en el suelo.

---

<sup>7</sup> La cuantificación de la sostenibilidad es esencial para valorar objetivamente el impacto de los sistemas de manejo sobre la productividad actual y potencial y sobre el medio ambiente. La sostenibilidad puede ser valorada por uno o varios índices. Los índices pueden ser simples o complejos si involucran uno o varios parámetros. Aunque los principios generales pueden ser los mismos, estos índices deben ser adaptados y sincronizados bajo las condiciones ambientales locales. Tomado de: Lal, Rattan. 1994. Métodos y normas para evaluar el uso sostenible de los recursos suelo y agua en el trópico. Servicio de apoyo para el manejo del suelo. Servicio de conservación del suelo (USDA). Agencia americana para el desarrollo internacional. SMSS Monografía técnica No.21. Corpoica - Regional seis. El Espinal Tolima. 96 Pp.

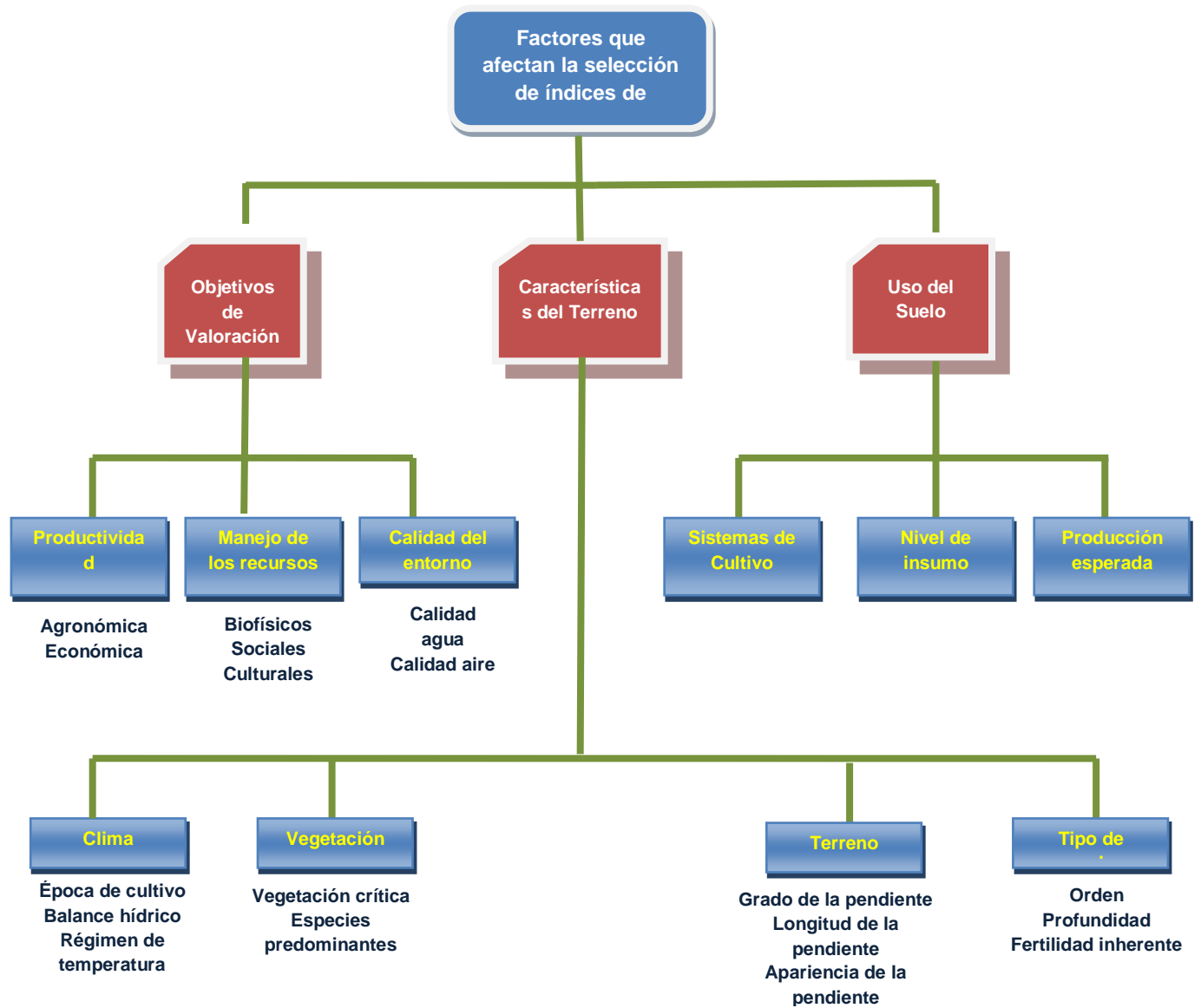


Figura 1. Factores que afectan la selección del índice de sostenibilidad<sup>8</sup>.

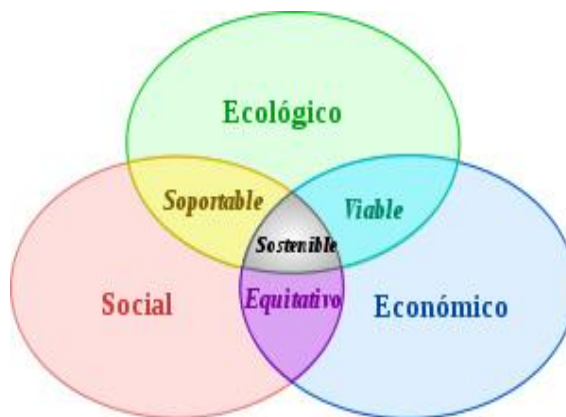
<sup>8</sup> Ibídem, Pág. 7.

---

Las principales metas de la medición del uso sostenible de los recursos suelo y agua son:

- Conservar y mejorar los recursos naturales para que sean utilizados por un tiempo muy largo.
- Caracterizar y cuantificar los principales procesos de degradación.
- Identificar la durabilidad y las características restaurativas de los recursos suelo y agua.
- Identificar las alternativas de manejo compatibles con las limitaciones y el potencial de los recursos.
- Evaluar la magnitud y las tendencias en los cambios en las propiedades y procesos de los recursos suelo y agua, bajo diferentes sistemas de manejo.
- Describir alternativas de política que estimulen el uso sostenible de los recursos.

En este sentido, los elementos implícitos en el concepto de sostenibilidad son: la dimensión económica, la social y la ecológica. La sostenibilidad ecológica se refiere a las características fundamentales para la supervivencia que deben mantener los ecosistemas a través del tiempo en cuanto a componentes e interacciones. La sostenibilidad económica implica la producción a una rentabilidad razonable y estable a través del tiempo, lo cual haga atractivo continuar con dicho manejo. Y, la sostenibilidad social aspira a que la forma de manejo permita a la organización social un grado aceptable de satisfacción de sus necesidades. El manejo sostenible puede, por lo tanto, significar distintas cosas según la función principal del recurso o del momento histórico en que se hace una evaluación.



**Figura 2. Componentes de la Sostenibilidad<sup>9</sup>**

El desarrollo agrícola sostenible abarca las tres vertientes. No parece posible optimizar simultáneamente cada uno de los tres componentes de la definición anterior, lo más conveniente es definir ciertos límites aceptables para cada uno de ellos y optimizar primero uno, procurando que la intensidad de los otros dos se ubique en el límite aceptable para ese momento y condición particulares. Con el transcurso del tiempo, los tres objetivos deberían ir acercándose a los óptimos ideales para cada uno de los tres componentes (**Cruz et al. 2004**<sup>10</sup>).

### **2.3. Servicios ecosistémicos**

Los Servicios de los Ecosistemas<sup>11</sup> (figura 3) son los beneficios que las personas reciben de los ecosistemas. En la historia humana todas las personas han

---

<sup>9</sup> Gráfico de la Sostenibilidad. Tomado de:

[http://ols.uas.mx/fen/gestione/Desp\\_Arts.asp?titulo=288](http://ols.uas.mx/fen/gestione/Desp_Arts.asp?titulo=288). Consultado el 3 de mayo de 2014.

<sup>10</sup> Cruz, Bautista. Et al. 2004. La calidad del suelo y sus indicadores. En: Ecosistemas 13(2): 90-97. Asociación Española de Ecología Terrestre AEET. en:

<http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=149>. Consultado el 23 de marzo de 2011.

<sup>11</sup> Servicios de los ecosistemas: Según la definición de la EM, los servicios de los ecosistemas son “los beneficios que las personas obtienen de los ecosistemas. Esto incluye servicios de aprovisionamiento tales como alimento y agua; servicios reguladores tales como la regulación de inundaciones, sequías, degradación de los suelos y enfermedades; servicios de apoyo tales como

---

comprendido que su bienestar se relaciona con el funcionamiento de los ecosistemas alrededor de ellos. Intensificar los impactos antropogénicos en los ecosistemas en todo el mundo y en el suministro de los servicios que proveen ha acentuado la necesidad de ir más allá del simple reconocimiento de la dependencia sobre el medio ambiente y crear más interacción sostenible. El término "servicios ecosistémicos" surgió a principios de los años 80, para describir un marco que estructurara y sintetizara los conocimientos biofísicos de los ecosistemas en términos de las características del bienestar humano. Comprender los ecosistemas desde la perspectiva de los seres humanos como beneficiarios tiene un potencial enorme para proteger los intangibles y los servicios que prestan. Los servicios de los ecosistemas determinan los enlaces de la conservación y el desarrollo mediante la relación medio ambiente - salud mental, salud humana, la seguridad y los bienes materiales necesarios para lograr el bienestar (**Brauman et al. 2007**<sup>12</sup>).

---

formación de suelos y ciclos de nutrientes; y servicios culturales de tipo recreativo, espiritual, religioso y otros beneficios no materiales". Este término corresponde con el uso que la Convención da a los términos "productos, funciones y propiedades". Está en debate la clasificación del agua como un servicio de aprovisionamiento y no como un servicio regulador.

<sup>12</sup> Brauman, Kate. et al. 2007. The Nature and Value of Ecosystem Services: An Overview Highlighting Hydrologic Services Annu. Rev. Environ. Resour. 2007. 32:6.1–6.32. The Annual Review of Environment and Resources is online at <http://environ.annualreviews.org>. University of Colorado. 34 Pp.



**Figura 3. Servicios de los ecosistemas.**

El análisis de los servicios de los ecosistemas se realiza en tres escalas: Mundial, Regional y Local (Figura 4) y están enmarcados en cuatro grandes temas: Bienestar humano y reducción de la pobreza, servicios de los ecosistemas, generadores de cambio indirecto y generadores de cambio directo.

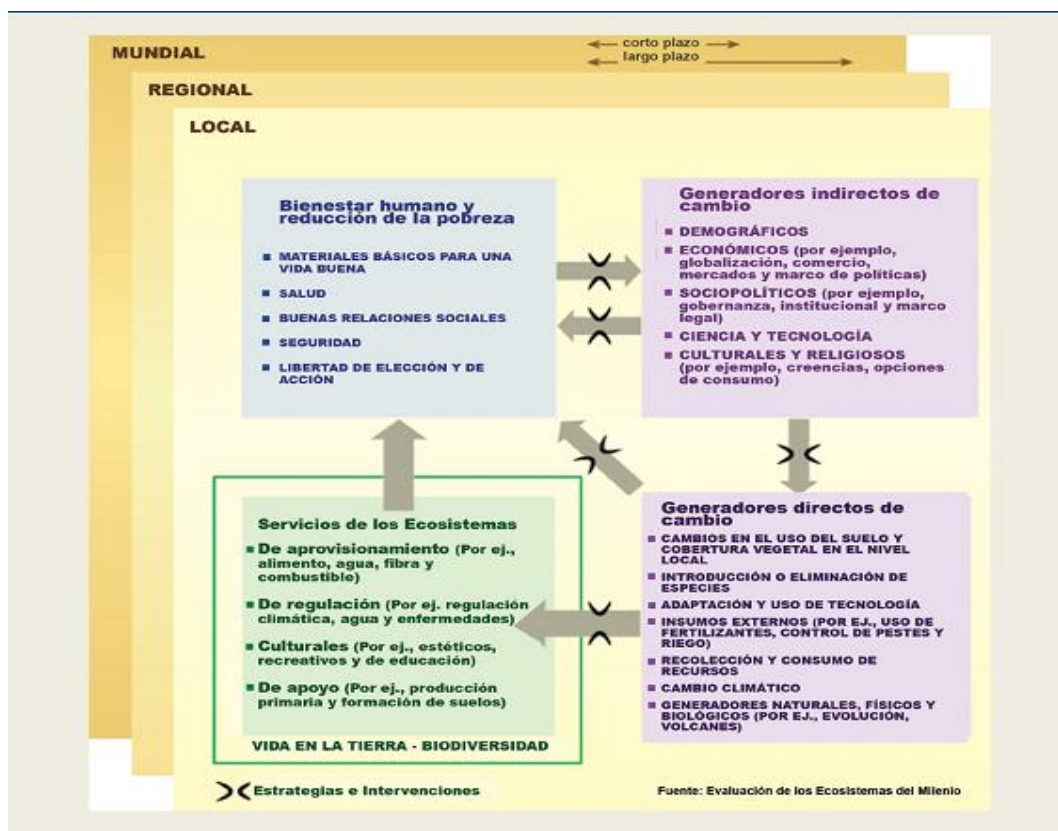


Figura 4. Marco conceptual de la evaluación de los ecosistemas del milenio<sup>13</sup>.

### 2.3.1. Funciones y Servicios Ecosistémicos del Suelo

El suelo es un componente fundamental de la biosfera ya que es la interfaz entre la tierra, el aire y el agua. Es un recurso no renovable, a escala de tiempo humana, que desempeña diversas funciones importantes para la vida (**Ballesta y**

<sup>13</sup> Evaluación de los Ecosistemas del Milenio, 2005. Los ecosistemas y el bienestar humano: humedales y agua. Informe de síntesis. World Resources Institute, Washington, DC. 80 Pp.

**Quiñones, 2006**<sup>14</sup>). Por su parte **Karlen et al. 1997.**, atribuyen las siguientes funciones al suelo:

1. Sostiene el crecimiento y la diversidad de plantas y animales aportando el medio físico, químico y biológico para los intercambios de agua, aire, nutrientes y energía.
2. Regula la distribución del agua entre la infiltración y escorrentía y regula el flujo de agua y solutos, incluyendo nitrógeno, fósforo, pesticidas y otros nutrientes y compuestos disueltos en el agua.
3. Almacena y modera la liberación de los nutrientes de los ciclos de las plantas y otros elementos.
4. Actúa como filtro para proteger la calidad del aire, agua y otros recursos.
5. Es el apoyo de estructuras y alberga riquezas arqueológicas asociados a la vivienda humana.
6. Filtra, amortigua, degrada, inmoviliza y detoxifica sustancias orgánicas e inorgánicas.

Los servicios ecológicos prestados por el suelo son fundamentales para los demás servicios de los ecosistemas (suministro, regulación y culturales) (**MEA 2005**). Recientemente, el tema de la valoración de los servicios prestados por la naturaleza se ha ido consolidando en diversos campos del conocimiento; en especial, se ha fortalecido la investigación relacionada con la valoración de los servicios previstos por los recursos suelo, agua, flora y fauna. El suelo provee servicios que benefician a la población humana, entre ellos se pueden nombrar diversos sistemas de producción y cultivo, sistemas pecuarios, ciclaje de nutrientes y producción primaria; además de ser un recurso fundamental para el secuestro o captura de carbono, regulaciones hídricas, control de inundaciones, entre otros factores.

---

<sup>14</sup> Ballesta Jiménez, R y González Quiñones, V. (2006). La Calidad de Suelos como medida para su conservación. Revista Edafología, Vol 13. (3). Universidad Autónoma de Madrid. Departamento de Geología y Geoquímica. Madrid España. PP 125-138.

---

## 2.4. Calidad del suelo

La calidad del suelo es un término que se ha venido utilizando de manera cada vez más frecuente en los estudios de la ciencia del suelo. Hay un sinnúmero de autores que han elaborado definiciones concretas para definir la calidad; **Jiménez Ballesta y González Quiñones (2006)** recrean algunas de estas definiciones:

**Larson y Pierce (1991)**. La capacidad de un suelo para funcionar dentro de los límites de los ecosistemas e interactuar positivamente con el medio ambiente externo a ese ecosistema. **Arshad y Coen (1992)**. Su capacidad para aceptar, almacenar y reciclar agua, minerales y energía para la producción de cultivos, preservando un ambiente sano. **Pierce y Larson (1993)**. Capacidad para uso. **Doran y Parkin (1994)**. La capacidad de un suelo para funcionar dentro de los límites de los ecosistemas para sostener la productividad biológica, mantener la calidad medioambiental, y promover la salud de animales y plantas. Sin embargo, una de las definiciones más aceptadas es la asumida por la Sociedad Americana de la Ciencia del Suelo (SSSA) como: “La capacidad de un suelo específico para funcionar, dentro de los límites de los ecosistemas naturales o manejados, para sostener productividad de plantas y animales y mantener o mejorar la calidad del agua y aire, y apoyar la salud humana y el hábitat” (**Karlen et al., 2008**).

Otro concepto considera la calidad del suelo como un tipo de función específica del suelo, dentro de los límites naturales del ecosistema, son el sustento para la productividad de las plantas y los animales, manteniendo o incrementando la calidad del agua y el aire, y son el soporte humano de la salud y la habitación (**USDA– NRCS, 2008**<sup>15</sup>).

---

<sup>15</sup> Soil quality physical indicators: selecting dynamic soil properties to assess soil function. 2008. Soil quality technical No.10. United States Department of Agriculture USDA. Natural Resources Conservation Service NRCS. Soil Quality National Technology Development Team. 7 Pp.

La calidad del suelo, o su capacidad de función, es un reflejo de sus propiedades inherentes y dinámicas. Las propiedades inherentes del suelo se formaron hace miles de años y son el resultado primario de los factores formadores del suelo: clima, topografía, material parental, microorganismos y tiempo. Algunos ejemplos de las propiedades inherentes del suelo son: textura del suelo, tipo de arcilla, profundidad del lecho rocoso y clases de drenaje.

Por su parte, las propiedades dinámicas del suelo pueden ayudar en la determinación e interpretación de los servicios ecológicos del suelo, como función esencial para las personas y el medio ambiente.

Las funciones del suelo son (**USDA - NRCS, 2008**):

- Sustento de diversidad biológica, actividad y productividad.
- Regulación y separación del agua y el flujo de solutos.
- Filtro y defensa, degradación, inmovilización y detoxificación de materiales orgánicos e inorgánicos, incluyendo productos por deposiciones atmosféricas industriales y municipales.
- Reserva y ciclo de nutrientes y carbono de la biosfera terrestre.
- Proveer estabilidad física y soporte a las plantas o estructuras socioeconómicas o protección de tesoros arqueológicos asociados con la habitación humana.

La calidad y la salud del suelo son conceptos equivalentes, no siempre considerados sinónimos (**Doran y Parkin, 1994**<sup>16</sup>). La calidad debe interpretarse como la utilidad del suelo para un propósito específico en una escala amplia de tiempo (**Cruz et al. 2004**). El estado de las propiedades dinámicas del suelo como

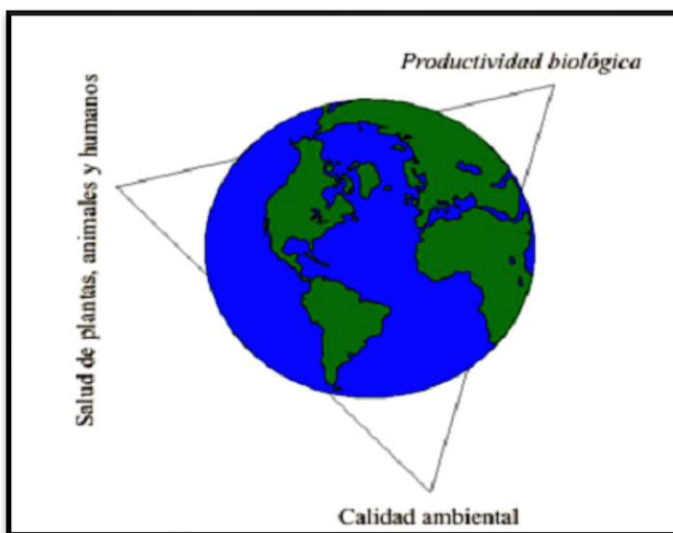
---

<sup>16</sup> Doran, J.W. y Parkin, B.T. 1994. Defining Soil Quality for a Sustainable Environment. Soil Science Society of America, Inc. Special Publication. Number 35. Madison, Wisconsin, USA.

contenido de materia orgánica, fertilidad, diversidad de organismos o productos microbianos en un tiempo particular constituye la salud del suelo (Adaptado de **Cruz et al. 2004**).

El término calidad del suelo se empezó a utilizar de manera frecuente, una vez se reconocieron las funciones del suelo (Adaptado de **Cruz, 2004**):

- (1) Promover la productividad del sistema sin perder sus propiedades físicas, químicas y biológicas (productividad biológica sostenible);
- (2) Atenuar contaminantes ambientales y patógenos (calidad ambiental); y
- (3) Favorecer la salud de plantas, animales y humanos. (**Doran y Parkin, 1994**; **Cruz, 2004**; **Karlen et al., 2008**). Figura 5.



**Figura 5. Principales componentes de la calidad del suelo (Doran y Parking, 1994).**

Al desarrollar este concepto, también se ha considerado que el suelo es el soporte fundamental para las plantas, puesto que es el encargado de captar, retener y emitir agua; y es un filtro ambiental efectivo. En consecuencia, este concepto refleja la capacidad del suelo para operar dentro de los límites del ecosistema del cual forma parte y con el que interactúa permanentemente.

La calidad del suelo es dinámica y puede cambiar en el corto plazo, de acuerdo con el uso y prácticas de manejo, y para conservarla es necesario implementar Prácticas sustentables en el tiempo. La evaluación de la calidad del suelo permite entender y revertir el deterioro en dicha funcionalidad ecosistémica, como sucede con: la pérdida de suelos por erosión, depositación de sedimento por viento e inundaciones, reducción de la infiltración, compactación de la capa superficial, pérdida de nutrientes, efecto de la presencia de pesticidas, cambios en el pH, aumento de la solubilidad de metales pesados, pérdida de materia orgánica, reducción de la actividad biológica, infestación de organismos patógenos y reducción de la calidad de agua (**Navarrete, 2011**).

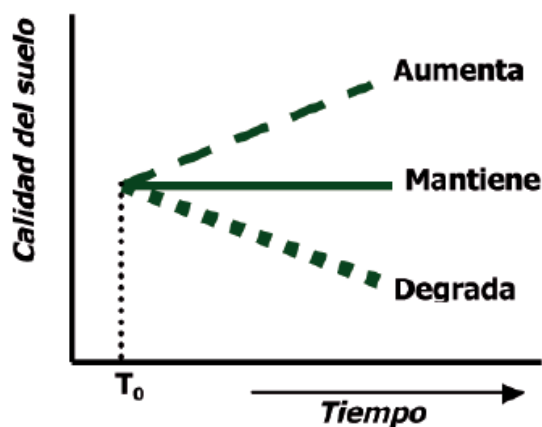
#### **2.4.1. Evaluación de la Calidad del suelo**

Aunque la calidad del suelo no puede medirse directamente, toma valor sin embargo como concepto que engloba el examen e integración de relaciones y funciones entre varios parámetros biológicos, químicos y físicos que son medidos e integrados para un sistema agrícola y medioambiental sostenible (**Karlen et al. 1997**). Se persigue, por tanto, evaluar la calidad del suelo con el fin de promover la mayor calidad posible y teniendo en cuenta que existe una relación directa entre la salud humana y la calidad de los suelos (**Karlen et al., 2008; Bautista Cruz, 2004; Ballesta Jiménez, 2006; Cantú, 2007; Navarrete Segueda, 2001; Martínez, 2006; Jiménez Ballesta y González Quiñones, 2006., Grimaldi et al; 2014**).

De esta forma, la evaluación de la calidad de los suelos se puede realizar siguiendo dos metodologías:

1. A lo largo del tiempo: Consiste en realizar mediciones periódicas en un mismo suelo y comparar los valores y observar los cambios producidos en el.
2. Tomando un suelo de referencia ideal y compararlo con nuestras mediciones.

De acuerdo con **Jiménez Ballesta y González Quiñones (2006)**. Las evaluaciones de la calidad del suelo deben tener en cuenta propiedades y procesos biológicos, químicos y físicos, de tal modo que la interpretación y las mediciones deben evaluarse con respecto a tendencias a largo plazo o a señales de sostenibilidad, que se traducirán en una degradación, mantenimiento o aumento de su calidad Figura 6.



**Figura 6. Posibles tendencias de la evaluación de la calidad del suelo (adaptado de Seybold et al., 1998. Citado por Jiménez Ballesta y González Quiñones., 2006).**

## 2.4.2. Indicadores de Calidad del suelo

Cualquier índice de calidad de suelo debe considerar la función del suelo, pero estas funciones pueden ser variadas y a menudo complejas (**González Quiñones, 2006**). Un suelo que es considerado de alta calidad para una función puede no ser igual para otras, como consecuencia hay potencialmente muchas propiedades del suelo que pueden servir como indicadores de la calidad del suelo (**Jiménez Ballesta y González Quiñones., 2006**).

Los indicadores de calidad del suelo se refieren a las propiedades del suelo medibles que influyen en la capacidad de realizar funciones de producción agrícola o medioambiental, **Jiménez Ballesta y González Quiñones, 2006; Cantú, 2007; Karlen et al., 2008; Martínez, 2006**). En consecuencia, se trata de identificar las propiedades físico-químicas y/o biológicas más utilizadas en la producción agrícola que además sirvan para identificar la calidad medioambiental, o bien, aquellas más unas nuevas que reflejen este último valor. En consecuencia, es deseable que los indicadores de calidad a utilizar sean:

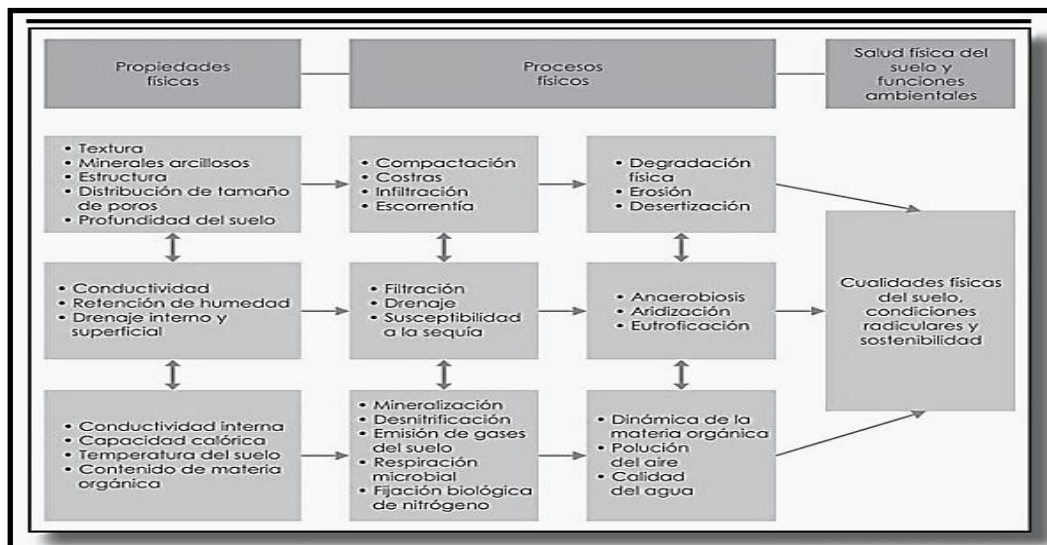
- Válidos y relevantes científicamente
- Datos fiables
- Representativos
- Sensibles a los cambios y útiles
- Sencillos
- Razonables en la relación Costo/beneficio.

## 2.4.3. Indicadores Físicos del Suelo

Las características físicas del suelo se constituyen en un factor fundamental cuando se espera evaluar la calidad de este recurso, puesto que no se pueden

mejorar fácilmente. Las propiedades físicas que pueden ser utilizadas como indicadores de la calidad del suelo son aquellas que reflejan la manera en que este recurso acepta, retiene y transmite agua a las plantas, así como las limitaciones que se pueden encontrar en el crecimiento de las raíces, la emergencia de las plántulas, la infiltración o el movimiento del agua dentro del perfil y que además están relacionadas con el arreglo de las partículas y los poros. La estructura, densidad aparente, estabilidad de agregados, infiltración, profundidad del suelo superficial, capacidad de almacenamiento del agua y conductividad hidráulica saturada son las características físicas del suelo que se han propuesto como indicadores de su calidad (Cruz et al. 2004).

Por su parte, **Rattan Lal (1994)** ha propuesto una amplia gama de propiedades y procesos físicos que afectan la calidad y salud del suelo. En la Figura 7 se presentan las propiedades físicas más relevantes, sus procesos y funciones ambientales.



**Figura 7. Propiedades físicas e hidrológicas y procesos relacionados con la calidad y la sostenibilidad del suelo (Tomado de: Lal, 1994).**

## **2.5. Características Mecánicas del suelo**

Incluyen la textura, la estructura y el tamaño del poro (diferenciados en macro, meso y microporos). Estos atributos influyen en varios procesos modificadores del suelo como la compactación y adensamiento, formación de costras y sellos en la superficie, infiltración del agua y escorrentía superficial. Al interactuar con las características climáticas, estos procesos pueden acentuar la degradación física que incluye erosión acelerada, desertificación y denudación.

## **2.6. Características Hidrológicas del suelo**

Comprenden la retención de humedad, las propiedades de transmisión y drenaje interno y superficial del suelo. Estos atributos de drenaje también influyen en varios procesos de modificación del suelo. Ej., filtración, drenaje profundo, escorrentía y susceptibilidad a la desecación. Al interactuar con las características de clima y uso de la tierra estos procesos conducen a la anaerobiosis, la aridización y la eutrofización de aguas naturales.

### **2.6.1. Características Térmicas**

Incluyen la capacidad de calor y la conductividad térmica que interactúan con el clima y el régimen de humedad de la tierra e influyen en la temperatura del suelo y el flujo de calor. Estos atributos influyen en una amplia gama de procesos modificadores del suelo, incluidos la mineralización o descomposición de la materia orgánica, la respiración microbiana, la desnitrificación y la biodiversidad del suelo. Cuando interactúan con el uso de la tierra, el manejo y con otros factores ecológicos, estos procesos influyen en las dinámicas del contenido de materia

orgánica del suelo y de los flujos de gases radiactivos procedentes de la tierra a la atmósfera.

Estas tres características: mecánicas, hidrológicas y térmicas, tienen un efecto fuerte modificador de la calidad física del suelo, las condiciones radicales y la sostenibilidad del recurso.

## **2.7. Propiedades físicas del suelo**

### **2.7.1. Textura del Suelo**

La textura del suelo consiste en la proporción numérica (porcentaje en peso) de la fracción arena, limo y arcilla. La fracción fina corresponde a las arcillas ( $\leq 2$  mm) y la fracción gruesa corresponde a las arenas (2 mm). La textura del suelo es calculada directamente en campo o en el laboratorio<sup>17</sup> y se determina con el hidrómetro o la pipeta, posteriormente los valores obtenidos se ubican dentro del triángulo textural (Figura 8) para obtener la clase de textura del suelo. La textura del suelo incluye sólo la fracción fina del suelo ( $\leq 2$  mm), los fragmentos gruesos como la grava ( $> 2$  mm) no se tienen en cuenta a la hora de determinar el tipo de textura de un suelo.

---

<sup>17</sup> Schoeneberger, P.J., D.A. Wysocki, E.C. Benham, and Soil Survey Staff (2012). Field book for describing and sampling soils, Version 3.0. Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, NE. Page 36.

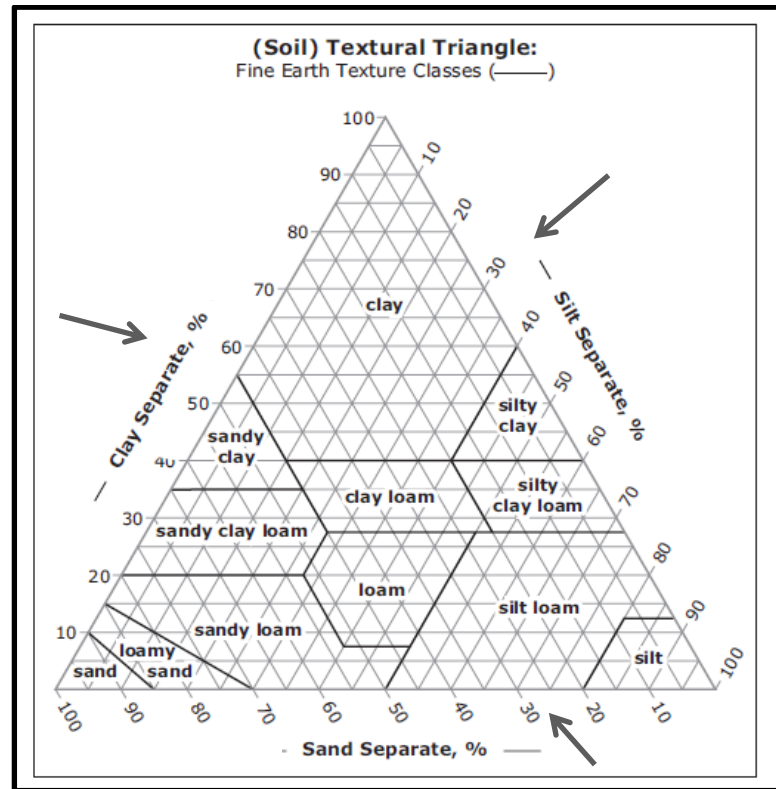


Figura 8. Triángulo para determinar la textura del suelo (Tomado de: Field book for describing and sampling soils, 2012).

La composición granulométrica de la fracción mineral del suelo, conjuntamente con la mineralogía de la fracción arcilla, es la característica del suelo con mayor influencia sobre las otras propiedades físicas e hidrológicas del suelo (Pla, 2010<sup>18</sup>). El autor indica que en dicha composición hay que distinguir entre la fracción fina (partículas con diámetro equivalente (DE) < 2 mm), compuesta de arcilla (partículas con DE < 2  $\mu$ m), limo (partículas con DE 2  $\mu$ m – 50  $\mu$ m) y arena (partículas con DE 50  $\mu$ m – 2 mm), y la fracción gruesa con DE > 2 mm, compuesta de grava (DE 2 – 50 mm) y piedras (DE > 50 mm).

<sup>18</sup> Pla, Ildfonso (2010). Medición y evaluación de las propiedades físicas de los suelos: dificultades y errores más frecuentes. I Propiedades mecánicas. En: Revista Suelos Ecuatoriales; Volumen 40 No. 2. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Bogotá D.C. Pág. 75-93.

## 2.7.2. Estructura del Suelo

La estructura es la disposición natural de las partículas del suelo en agregados que resultan de los procesos pedogenéticos.<sup>19</sup> También se define como el tamaño, la forma y el arreglo de las partículas primarias que constituyen los agregados del suelo (**Montenegro y Malagón, 1990**<sup>20</sup>). Las estructuras pueden ser simples o compuestas. Las estructuras simples son: granular, masiva, cementada. Mientras que las estructuras compuestas son: migajosa, bloques, columnar y laminar (Figura 9).

---

<sup>19</sup> Schoeneberger, P.J., D.A. Wysocki, E.C. Benham, and Soil Survey Staff (2012). Field book for describing and sampling soils, Version 3.0. Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, NE. Page 52.

<sup>20</sup> Montenegro, H. Malagón, D. (1990). Propiedades físicas de los suelos. Bogotá D.C. IGAC. 813 Pp.

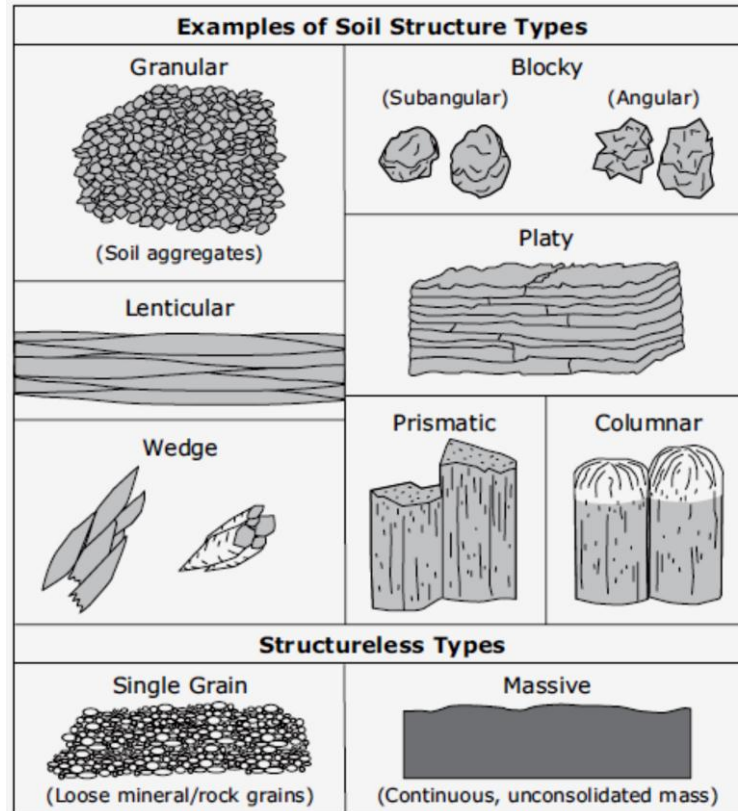


Figura 9. Ejemplo de los tipos de estructura del suelo (Tomado de: Field book for describing and sampling soils, 2012).

### 2.7.3. Estabilidad de Agregados

El conocimiento del estado estructural del suelo en un momento dado no es a veces suficiente, ya que cambia continuamente por la acción de diferentes factores (entre los que se destaca el agua), especialmente en el suelo superficial y en la capa arable (Pla, 2010). Por ello, en muchos casos, la estabilidad de los agregados, que es una propiedad dinámica, es más importante que el estado estructural. Es frecuente referirse a dicha estabilidad estructural como uno de los

---

“índices” más importantes de la llamada “calidad de un suelo”, y su evaluación suele justificarse en ese sentido<sup>21</sup>.

La estabilidad de los agregados al agua es una propiedad fundamental para la conservación de la estructura y del suelo mismo. Algunos suelos se deterioran frente a la acción de las gotas de lluvia o de la escorrentía, mientras otros muestran mayor resistencia a estos fenómenos. La medición de la estabilidad estructural se basa en la mayor o menor resistencia de los agregados a la acción del agua. Hay varios métodos para medir el grado de estabilidad de los agregados al agua, siendo el más conocido y utilizado el método de Yoder.

#### **2.7.4. Densidad Aparente**

La densidad aparente (D.a) se define como la masa de suelo seco por unidad de volumen. Es un indicador importante en la calidad del suelo, debido a sus efectos potenciales sobre la raíz de la planta, exploración de desarrollo, y por tanto, el volumen de suelo que cada planta puede explorar para suplir su agua y sus necesidades de nutrientes. Las prácticas de manejo tales como la labranza, tráfico de maquinaria en el momento de las operaciones de campo (debido a la interacción con el contenido de agua del suelo) pueden producir una densidad alta en el suelo (**Karlen et al. 2008**), favoreciendo condiciones para la compactación.

---

<sup>21</sup> Pla, Ildelfonso (2010). Medición y evaluación de las propiedades físicas de los suelos: dificultades y errores más frecuentes. I Propiedades mecánicas. En: Revista Suelos Ecuatoriales; Volumen 40 No. 2. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Bogotá D.C. Pág. 75-93.

La densidad aparente del suelo (relación masa/volumen) presenta grandes variaciones, tanto en sentido vertical como horizontal en el perfil del suelo, a estas variaciones se agregan las variaciones temporales, especialmente en los primeros centímetros del suelo. Lo anterior lleva a considerar que es muy difícil establecer valores óptimos o críticos de densidad aparente para todos los suelos, sin tener en cuenta también las limitaciones para el crecimiento vegetal (**Pinzón, 2009**). Los métodos más utilizados para la determinación de la densidad aparente son los del terrón parafinado (en estudios de clasificación de suelos), el de los cilindros de suelo no alterados de diferentes dimensiones, y el de excavación, que es el que utiliza mayor tamaño de muestra, es menos dependiente de las condiciones del suelo a muestrear y resulta en una menor variabilidad en las mediciones (**Pla, 2010**).

### **2.7.5. Porosidad**

La porosidad del suelo está representada por el porcentaje de poros existentes en el mismo con relación al volumen total. La porosidad depende de la textura, de la estructura y de la actividad biológica del suelo. Cuánto más gruesos son las partículas texturales, mayor es el espacio entre ellas. La capacidad de aire y drenaje en el suelo está relacionada con los poros de gran tamaño o macroporos (60 micrómetros), los poros medianos o Mesoporos (10 a 60 micrómetros), los que son utilizados en la conducción de agua y los poros pequeños o microporos (10 micrómetros) que son los responsables del almacenamiento o retención de agua aprovechable por las plantas.

La distribución por tamaño de poros en el suelo depende de la estabilidad de los agregados, y fundamentalmente de los macroporos o espacios de los interagregados, que son los responsables principales de la conductividad hidráulica del suelo. Como la estabilidad estructural de los suelos depende de las

---

fuerzas relativas de atracción y repulsión entre partículas, es evidente que las variables de agua y suelo de las que dependen las mismas son las que en definitiva determinan el estado de agregación del suelo (**Torrente, 2007**).

El espacio poroso y la distribución del tamaño de los poros en un suelo afectan muchos de los fenómenos, tales como el almacenamiento y movimiento del agua y los gases, los cuales influyen sobre el crecimiento de las plantas. La porosidad total comúnmente se ha calculado a través de las densidades aparente y real del suelo, sin embargo este procedimiento es apropiado para arcillas no expandibles, ya que en suelos expandibles su uso e interpretación deben ser cuidadosos, debido a los cambios físicos variables, con el contenido de humedad y volumen (**Torrente, 2007**).

### **2.7.6. Humedad**

Gran parte del agua que utilizan las plantas es la que queda retenida en el suelo una vez que se pierde el exceso por drenaje interno. Dicha retención de agua está determinada tanto por las características intrínsecas del material del suelo, como por las condiciones de drenaje interno. La influencia de estas últimas, determinadas fundamentalmente por las propiedades hidráulicas del perfil de suelo, y por la profundidad del nivel freático, no puede apreciarse, sino con determinaciones de campo (**Pla y Jaramillo, 2011<sup>22</sup>**).

Una vez que cesan las pérdidas de agua por drenaje, parte del agua que queda es utilizable por las plantas, siguiendo un patrón de uso característico para cada

---

<sup>22</sup> Pla Sentís, Ildelfonso. Jaramillo, Daniel F (2011). Metodologías – Propiedades Físicas del Suelo. Compilado por: Edgar Enrique Madero y Jorge Armando Ramírez. Escuela de Posgrados. Universidad Nacional de Colombia – Sede Palmira. 85 Pp.

combinación de suelo, planta y clima, pero que está determinado en gran parte por el flujo del agua en el suelo hacia las superficies absorbentes de las raíces. Por limitaciones en dicho flujo, se alcanza un punto cuando ya el suelo es incapaz de suplir las demandas de la planta, o sea, que una parte del agua retenida se hace inutilizable. Otra parte del agua retenida se pierde por evaporación directa del suelo, lo cual también depende del flujo de agua desde cualquier parte del suelo a la superficie de evaporación en o cerca de la superficie del suelo.

Cuando se estima la humedad del suelo se trata de establecer la cantidad de agua que contiene el suelo, expresada como porcentaje, con base en el peso (contenido gravimétrico), o en el volumen (contenido volumétrico) de una muestra representativa de aquel. La manera más común de medir la humedad del suelo es la gravimétrica y se calcula con base en el suelo seco al horno (**Pla y Jaramillo, 2011**).

### **2.7.7. Curva de retención de humedad del suelo**

También es conocida como curva característica de humedad del suelo. Es una gráfica que representa la relación existente entre el potencial total del agua del suelo y el contenido de humedad del mismo, en un amplio rango de tensiones. Esta relación tiene una dependencia muy grande con la textura del suelo. Es una herramienta indispensable en el manejo de riegos y sirve para establecer controles en el campo, utilizando generalmente, los tensiómetros.

Para establecer la curva, en el laboratorio, las muestras de suelos se someten a diferentes presiones (0.1, 0.3, 1, 5, 10 y 15 Bar, por ejemplo) y cuando se llega al equilibrio, se determina el contenido de humedad que presenta la muestra por el método gravimétrico.

---

Teniendo definida la curva de retención de humedad de un suelo, puede establecerse el contenido de humedad que presenta éste en cualquier momento, al medir en el campo la tensión con que esa agua está retenida (**Jaramillo, 2002**).

La capacidad de almacenamiento de la humedad del suelo esta esencialmente gobernada por su constitución mineral y orgánica de tal manera que el arreglo de la fracción sólida da lugar a la conformación del espacio poroso (aéreo), que bajo la acción de los agentes que intervienen en su manejo, le confieren al sistema características específicas que definen el estado y su potencialidad para la producción y el diseño de los planes agrícolas (**Torrente, 2007**).

El volumen de agua que retiene un suelo contra las fuerzas de gravedad determina el contenido de agua óptimo para la producción vegetal. En este nivel de humedad las raíces ejercen una mínima energía para la adsorción de agua y nutrientes, nivel que se agota a medida que transcurre el tiempo y debe reponerse con una frecuencia tal, que las plantas no alcancen el stress hídrico. Es importante identificar y estudiar los fenómenos físicos asociados a los cambios de humedad en el suelo y sus implicaciones sobre estas propiedades: densidad – volumen específico, contracción – expansión, dispersión – agregación, conductividad hidráulica, temperatura y color. La retención de humedad es posible evaluarla en campo o en laboratorio y sus cambios se representan en el suelo a través de la curva de retención (**Torrente, 2007**).

### **2.7.8. Infiltración**

Infiltración es el proceso por el cual el agua que llega a la superficie del suelo penetra en él, tanto por efecto de la gravedad (poros más grandes) como de la

capilaridad (poros de menor radio) (**Pla, 2010**). Velocidad de infiltración es una medida de la velocidad a la cual penetra en el suelo el agua y se expresa generalmente en mm/hora o en m/s.

El agua puede alcanzar la superficie del suelo por escorrentía superficial, por lluvia y por riego en sus diferentes modalidades (inundación, surcos, goteo, aspersión). La relación entre la velocidad de llegada del agua a la superficie del suelo y la velocidad de infiltración a través de ella, determina la distribución de dicha agua entre escorrentía (o anegamiento temporal en tierras planas) e infiltración. Esto a su vez determina las posibilidades de pérdida de suelo por erosión (en tierras en pendiente) y de almacenamiento de agua en la zona radical del suelo. El conocimiento de los efectos que sobre el proceso de infiltración tienen las propiedades físicas del suelo y la suplencia de agua es muy importante para lograr un manejo y conservación de suelos y agua eficientes, especialmente cuando la suplencia de agua ocurre a través de la lluvia (**Pla, 2010**).

### **2.7.9. Conductividad Hidráulica del suelo**

Esta cualidad es la que define las posibilidades que tiene el agua de moverse dentro del suelo; la propiedad que se mide para evaluar dicha posibilidad se conoce como conductividad hidráulica del suelo y se representa como  $K_s$  o simplemente  $K$ ; por su definición, es una cualidad que se relaciona estrechamente con el drenaje del suelo.

La conductividad hidráulica del suelo es fuertemente dependiente de su contenido de humedad y puede disminuir varios órdenes de magnitud al pasar del estado de saturación a punto de marchitez permanente (**Jaramillo, 2002**). La conductividad hidráulica del suelo es máxima cuando está saturado, pues todos los poros están llenos con agua y actúan como conductores; además, a mayor tamaño de poros, mayor es la conductividad, por lo cual es una propiedad que

---

depende fuertemente de la estructura, la textura y la composición mineralógica de las arcillas.

Para estudios de balances hídricos en el suelo, en especial cuando se evalúan problemas de retención de agua a capacidad de campo, drenaje interno del suelo y de posibilidades de erosión por movimientos en masa, muchas veces, a parte de las mediciones para estimar la velocidad de infiltración superficial (que en sus valores mínimos se corresponde aproximadamente con la conductividad hidráulica saturada ( $K_s$ ) del suelo en su conjunto, pero especialmente del suelo superficial), se requieren mediciones para estimar la conductividad hidráulica, en especial la saturada, a diferentes profundidades en el perfil del suelo y en el subsuelo. Esto es más fundamental en suelos con gran variabilidad vertical, derivada de procesos pedogenéticos o provocada por el uso y manejo de las tierras (Pla, 2010).

## **Capítulo 2**

### **Materiales y Métodos**

### 3. Materiales y Métodos

#### 3.1. Descripción de la zona de estudio

##### 3.1.1. Ubicación y Aspectos Generales

El proyecto se desarrolló en la Vereda Canelos perteneciente al Municipio de Florencia, Vereda Balcanes, Municipio de San Vicente del Caguán y la Vereda Aguadulce en el Municipio de Belén de los Andaquíes, Departamento de Ciénega – Colombia, Sur América (Figuras 10, 10a, 10b y 10c).

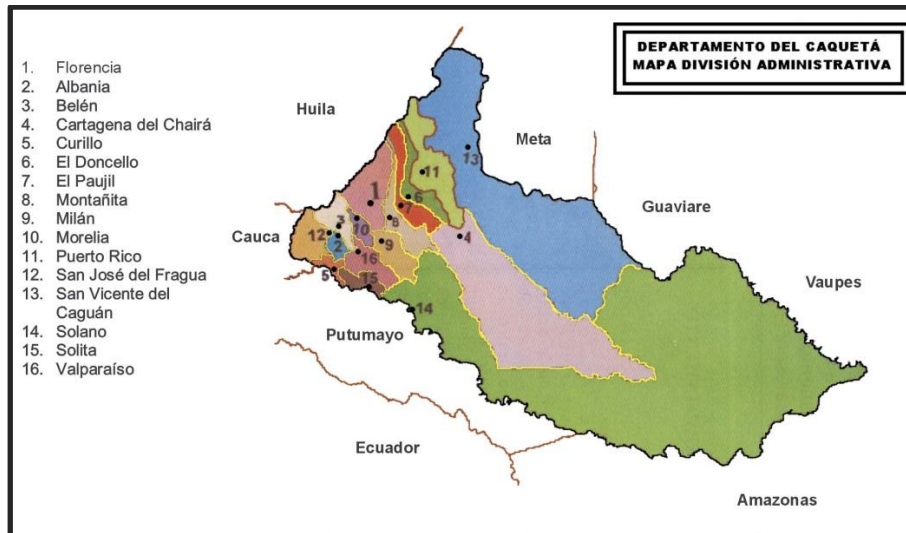


Figura 10. División Política – Administrativa del Departamento de Caquetá, Colombia – Sur América<sup>23</sup>.

<sup>23</sup> Tomado de:

[http://www.disaster-info.net/desplazados/informes/rut/estudio08/02generalidades.htm#\\_ftn8](http://www.disaster-info.net/desplazados/informes/rut/estudio08/02generalidades.htm#_ftn8).

Consultado el 17 de Junio de 2014.

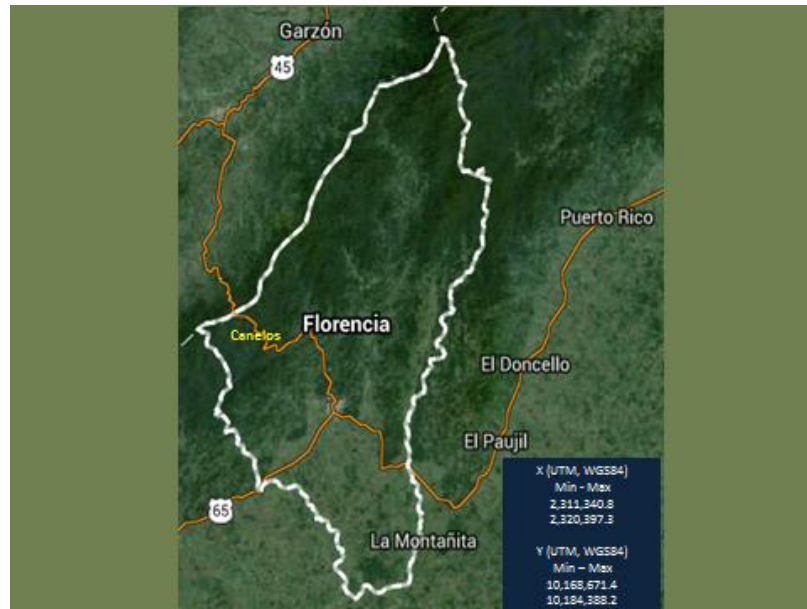


Figura 10 (a). Localización geográfica de la vereda canelos, Municipio de Florencia – Departamento de Caquetá, Colombia – Sur América.

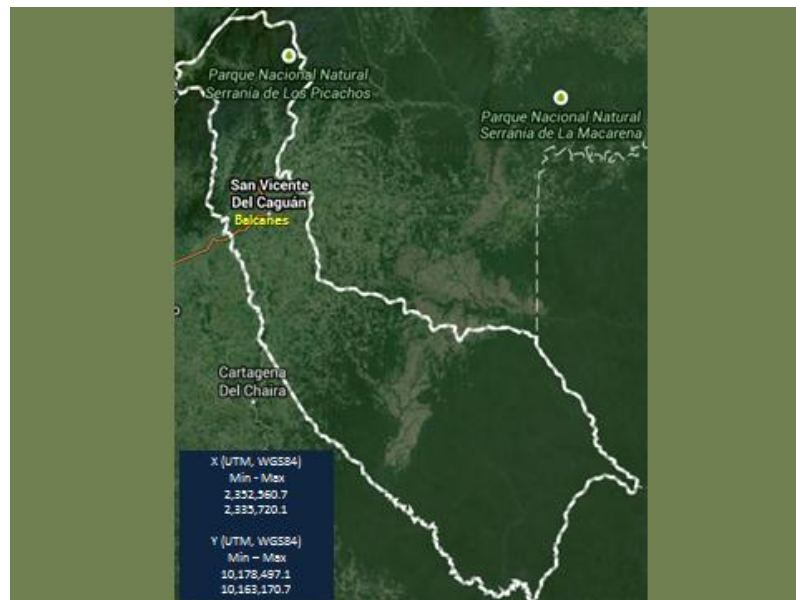
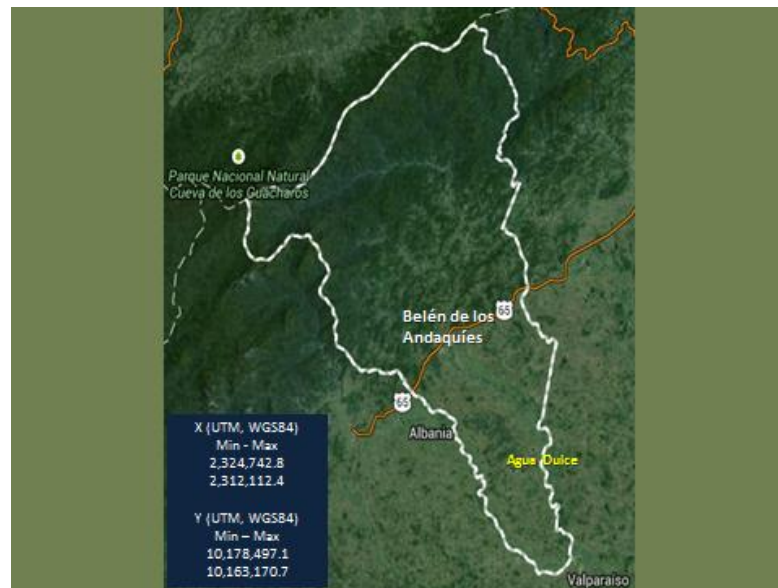


Figura 10 (b). Localización geográfica de la vereda balcanes, Municipio de San Vicente del Caguán – Departamento de Caquetá, Colombia – Sur América.



**Figura 10 (c).** Localización geográfica de la vereda agua dulce, Municipio de Belén de los Andaquíes – Departamento de Caquetá, Colombia – Sur América.

En estas zonas de estudio en Colombia poco queda de la cubierta forestal originaria (las áreas están ubicadas entre 20 y 60 km de Florencia, Región del piedemonte de la Cordillera oriental de los Andes), donde la deforestación comenzó en la década de 1940. Las tres áreas difieren en su uso del suelo: **Canelos** tiene sistemas tradicionales dedicados a la producción de lácteos y a la cría extensiva de ganado en fincas relativamente grandes, con pasturas viejas y degradadas; En **Balcanes** se presentan sistemas silvopastoriles, donde la base son cultivos forrajeros de leguminosas, pastos mejorados cuya base es la optimización de la producción ganadera; y en **Agua Dulce** se combina un modelo agroforestal de cacao, pastos nativos y frutales (Grimaldi et al., 2014)<sup>24</sup>.

El departamento del Caquetá se encuentra localizado al sur del país, sobre la margen izquierda del río Caquetá, situado entre los 2° 58' de latitud norte y 0° 40' de latitud sur, y entre los 71° 30' y los 76° 15' de longitud al oeste de Greenwich

<sup>24</sup> Grimaldi, Michel et al. (2014). Ecosystem services of regulation and support in Amazonian pioneer fronts: searching for landscape drivers. In: Landscape Ecology. Volume 29, Number 2 - DOI 10.1007/s10980-013-9981-y. Springer Science - Business Media Dordrecht. 311- 328 Pp.

(Estrada González et al; 2004). Al menos el 90% de la población del Caquetá se encuentra asentada en el paisaje de piedemonte; esta región ha servido como antesala para la colonización de la selva y su población está estimada en 350.000 habitantes, ubicados en los 16 municipios que comprenden su jurisdicción (SINCHI, 2007; Estrada González et al; 2004). El área de piedemonte donde se localizan once de los dieciséis municipios y consecuentemente el mayor porcentaje de la población es la más afectada por la acción antrópica, entre ellos se encuentra los municipios donde se desarrolló esta investigación.

El estudio se llevó a cabo en suelos ubicados en el piedemonte amazónico Colombiano, en 27 fincas agrupadas en tres (3) sistemas de uso del suelo predominantes: Tradicional, Silvopastoril y Agroforestal (Fotografía No.1). La altitud de las fincas oscila entre los 900 y 1.100 (m.s.n.m), con un régimen de lluvias unimodal, precipitación media anual de 3.307 mm, reportándose los valores más bajos de precipitación en el período de diciembre a enero, mientras que los registros más altos se presentan entre mayo y junio. La temperatura promedio es de 25.3 °C, con registro mínimo promedio de 21.5°C (Junio – Agosto) y una temperatura máxima promedio de 30.2°C (Diciembre – Enero)<sup>25</sup>.



---

<sup>25</sup> INSTITUTO AMAZONICO DE INVESTIGACIONES CIENTIFICAS SINCHI. 2007. Balance anual sobre el estado de los ecosistemas y el ambiente de la amazonia colombiana 2006. Bogotá D.C.



**Fotografía 1. Sistemas de Uso del suelo en el piedemonte amazónico: A. Sistema Tradicional, B. Sistema Silvopastoril y C. Sistema Agroforestal (Fuente: Pilar Hurtado, 2011).**

### 3.1.2 Descripción de los suelos del piedemonte amazónico

El área intervenida de la amazonia colombiana es una zona que nace en el flanco este de la cordillera Oriental de Colombia, formada por un área montañosa completada por un relieve de colinas o lomas suaves de aspecto ondulado en donde predomina finalmente un valle extenso, el cual, según la clasificación de **Holdridge (1978)**, corresponde a bosque húmedo<sup>26</sup> (Bh).

En la región predominan los suelos de textura fina, de color pardo amarillento y rojizo. De acuerdo con las propiedades químicas, los suelos presentan alto grado de acidez (el 95% con valores de pH de 4.5 a 5.8), con una capacidad de intercambio catiónico de baja a media, y baja saturación de bases, con alto contenido o saturación de aluminio (>60%), alcanzando en algunos casos niveles tóxicos para algunas plantas, y con baja concentración de carbono, fósforo, potasio y magnesio. La baja fertilidad natural de los suelos y su reducido potencial

---

<sup>26</sup> César Augusto Estrada González. et al; 2004. Aporte al conocimiento y sostenibilidad del agroecosistema intervenido de la amazonia colombiana. Florencia: Universidad de la Amazonía. Pp. 11.

de suministro de nutrientes a las plantas se debe principalmente a la alta acidez, al elevado contenido de aluminio intercambiable, a la baja saturación de bases, al poco nivel de fósforo aprovechable y por último al escaso contenido de materia orgánica, el cual se encuentra limitado a la capa superficial del suelo en los primeros 10 cm de profundidad (**Estrada González et al; 2004**).

### **3.1.3. Selección de las Ventanas (sistemas) y Usos del Suelo.**

Para la realización de la presente investigación se seleccionaron 3 Ventanas Paisajísticas (Sistemas de Uso Dominantes en el Paisaje) características del piedemonte amazónico: Tradicional, Silvopastoril y Agroforestal. En cada sistema de uso del suelo dominante (ventana paisajística) se seleccionaron nueve (9) fincas y se definieron cinco (5) puntos de muestreo por cada finca cada 200 metros lineales (siguiendo un transepto de 1 km) para un total de 135 muestras (figura 11). En cada finca se definieron 5 puntos de muestreo y en el punto central de estos 5 se determinó una muestra completa a profundidades de 0-40 cm. Todas las variables de los 135 puntos se determinaron a profundidad de 0-10 cm. Sin embargo, algunas propiedades físicas fueron determinadas a 3 profundidades (0-5, 10-15 y 20-40 cm).



Figura 11. Descripción general de la metodología empleada en el trabajo de campo.

En cada finca, se realizó una descripción completa del perfil del suelo y se trabajaron cuatro (4) cajuelas de 0.5 m x 0.5 m x 0.5 m, donde se tomaron muestras de suelo no disturbadas y se recopilaron los datos para la evaluación de las variables físicas (Figura 11a).

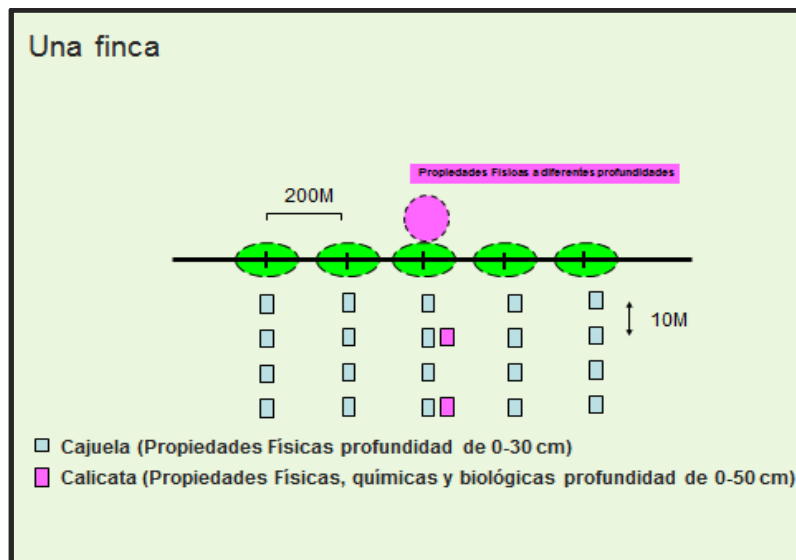


Figura 11(a). Descripción general de la metodología empleada para la toma de muestras de suelo en campo.

Los análisis de laboratorio se realizaron en el laboratorio de física de suelos del Centro Internacional de Agricultura Tropical CIAT- Palmira, Valle del Cauca. Los sistemas productivos seleccionados fueron:

▪ **3.1.3.1. Sistema de Ganadería Tradicional “CTR”:**

Áreas dedicadas a la ganadería extensiva, es común encontrar monocultivos de gramíneas (pastos nativos, pastos mejorados), solos o combinados con especies arbóreas dispersas, también se encuentran plantaciones de palma africana y/o rastrojos de 3 a 10 años de establecidos.

▪ **3.1.3.2. Sistema Silvopastoril “CSP”:**

Áreas dedicadas a la producción ganadera mejorada, hay suplementación de forraje de alta calidad con gramíneas para el pastoreo, bancos de proteína y bancos energéticos. En este sistema se evidencia un mejoramiento de las unidades de producción tradicional donde además de las pasturas nativas, se introducen gramíneas de alta calidad (*Brachiaria* spp) y leguminosas, conformando bancos de proteína con especies arbóreas como el caucho (*Hevea brasiliensis*) y las especies que conforman el bosque secundario en la Región.

▪ **3.1.3.3. Sistema Agroforestal “CAF”:**

Áreas con ganadería, suplementación con forrajes de alta calidad, gramíneas para pastoreo, bancos de proteína, producción agroforestal con caucho y frutales amazónicos. En este sistema se encuentran arreglos diversos con especies leñosas de bosques intervenidos, rastrojos jóvenes, bosque secundario y cultivos perennes como caucho (*Hevea brasiliensis*), borojo (*Borojoa patinoi*), cacao (*Theobroma cacao* L.) y especies amazónicas como arazá (*Eugenia Stipitata*), copoazu (*Theobroma grandiflorum*) y cultivos semestrales de pancoger como el maíz (*Zea mays*) y la yuca (*Manihot esculenta cranz*).

Por su parte, los usos de suelo evaluados (Figura 13) se describen de la siguiente manera:



Figura 122. Ventanas paisajísticas y usos del suelo evaluados.

**3.1.3.3.1 Pasto Limpio (PL):** Con dominio de una gramínea, no se observa otro tipo de vegetación proveniente del bosque original (Fotografía 2).



**Fotografía 2. Uso de suelo pasto limpio PL (Fuente: Pilar Hurtado, 2011).**

**3.1.3.3.2. Pasto con Árboles Dispersos (PAD):** Con dominio de una gramínea con presencia de árboles y arbustos nativos (Fotografía 3).



**Fotografía 3. Uso de suelo pasto con árboles dispersos PAD. (Fuente: Pilar Hurtado, 2011).**

**3.1.3.3.3. Pasto con Leñosas (PLÑ):** con dominio de una gramínea, sin embargo cuando el pastizal es joven o cuando la separación entre cada pie de gramínea y la carga animal no se respeta, crecen arbustos. Hay competencia entre las gramíneas y los arbustos que crecen rápidamente (Fotografía 4).



**Fotografía 4.. Uso de suelo pasto con leñosas PLÑ (Fuente: Pilar Hurtado, 2011).**

**3.1.3.3.4. Barbecho Viejo (RV):** con vegetación secundaria baja, el estrato vegetal más alto no supera 3 o 4 m (Fotografía 5).



**Fotografía 5. Uso de suelo barbecho viejo RV (Fuente: Pilar Hurtado, 2011).**

**3.1.3.3.5. Sistema Agroforestal (PA):** arbustos forrajeros de alto valor proteico (Fotografía 6).



**Fotografía 6. Uso de suelo agroforestal PA (Fuente: Pilar Hurtado, 2011).**

### 3.2. Variables asociadas a propiedades físicas

Las variables evaluadas fueron: Textura por el método del Hidrómetro o Bouyoucos (**Forsythe, 1975**); densidad aparente con el método del cilindro de volumen conocido (**Forsythe, 1980**); La densidad real se obtuvo con el método del picnómetro (**IGAC, 1990**); La porosidad total se determinó por fórmula:  $(1 - (DA/DR) * 100)$  **Montenegro y Malagón, 1990**; La humedad gravimétrica (Relación entre la masa de agua y la masa seca de los sólidos del suelo) de acuerdo con **Montenegro y Malagón, 1990**; Curvas de Retención de humedad. (Cilindros sometidos a saturación, presiones de 75 cm en Mesa de Tensión y 0.3, 1 y 15 bares en ollas y platos de presión), de acuerdo con metodología descrita por **Montenegro y Malagón, 1990**; La resistencia vertical a la penetración se determinó con un penetrómetro manual tipo IB (marca Eijkelkamp) con dos muelles de 100 y 150 N de compresión, junto con dos puntas cónicas con una superficie de área de 0.25 y 0.50 cm<sup>2</sup> (**Blanco – Sepúlveda, 2009**); La resistencia tangencial al corte con un torcómetro; La conductividad hidráulica se determinó con el método del permeámetro de cabeza constante (**Forsythe, 1980**); La macroporosidad, mesoporosidad y microporosidad se determinó con la metodología de cilindros sometidos a presión de 75 cm en mesa de tensión y 0.3, 1 y 15 bares en ollas y platos de presión (**Montenegro y Malagón, 1990**); La Estabilidad estructural se desarrolló con el método de Yoder (**1936**) modificado, usando un juego de tamices de 6, 4, 2, 1 y 0.125 mm.

### 3.3. Procesamiento estadístico y análisis de datos

Para evaluar la relación existente entre parámetros de suelo medidos y la variación entre diferentes usos del suelo se utilizó la técnica estadística

multivariada de análisis de componentes principales ACP<sup>27</sup>. Este procedimiento permite examinar todos los datos en un espacio de menor dimensión al espacio original de las variables, identificando las propiedades más sensibles en los tratamientos estudiados. Con el ACP se construyen ejes artificiales llamados componentes principales (CP), que permiten obtener gráficos de dispersión de observaciones y/o variables no correlacionadas con propiedades óptimas para la interpretación de la variabilidad y covariabilidad subyacente (**Campitelli et al. 2010**). El procesamiento de datos se realizó a través del programa estadístico R<sup>28</sup> version 2.15.0 (2012-03-30) Copyright (C) 2012. Que posibilita el desarrollo de análisis multivariados y se utilizó el paquete estadístico ADE-4.

A partir del análisis de componentes principales, se construyó el indicador para la evaluación de la calidad física y los servicios hídricos en suelos del piedemonte amazónico, siguiendo la metodología propuesta por **Velásquez, 2007**:

- Análisis de Componentes Principales ACP, ayudo en la definición de los parámetros que determinan la variación entre los diferentes usos del suelo.
- Se identificaron las variables que más discriminan los sistemas de usos del suelo de acuerdo a la calidad física del suelo.

---

<sup>27</sup> Un mejor conocimiento del proceso suelo – ecosistema necesita de la evaluación de varias propiedades y de herramientas analíticas multivariadas (Sena et al., 2002. Citado por Campitelli et al., 2010). Los métodos no supervisados de estadística multivariada tienen en cuenta las correlaciones entre numerosas variables que son analizadas simultáneamente, de tal modo que permiten sintetizar e interpretar la información. La utilización de la técnica estadística multivariada de análisis de componentes principales (ACP), ha hecho posible la resolución de numerosos problemas como por ejemplo la determinación de propiedades discriminantes de manejo en suelos semiáridos (Quiroga et al., 1998. Citado por Campitelli et al., 2010), la evaluación de los impactos de las labranzas sobre la calidad del suelo (Wander & Bollero, 1999. Citado por Campitelli et al., 2010). El ACP es usado para agrupar suelos de una población estudiada y permite la interpretación de las potenciales causas de las diferencias observadas en las propiedades del suelo. Campitelli, P; A Aoki; O Gudelj; A Rubenacker & R Sereno. 2010. Selección de indicadores de calidad de suelo para determinar los efectos del uso y prácticas agrícolas en un área piloto de la región central de Córdoba. Ciencia del Suelo 28(2):223-231.

<sup>28</sup> The R Foundation for Statistical Computing ISBN 3-900051-07-0 Platform: x86\_64-pc-mingw32/x64 (64-bit).

- Se construyeron subindicadores con cada grupo de variables.
- Se combinaron los subindicadores para generar un indicador potencial de calidad hídrica en los suelos del piedemonte amazónico



## **Capítulo 3**

### **Resultados y Discusión**

## Resultados

Los suelos del Piedemonte Amazónico presentan un alto nivel de degradación, como producto de los procesos intensivos de colonización y cambio abrupto en el uso del mismo, altos índices de deforestación y prácticas de manejo que presentan conflicto con las condiciones naturales del recurso.

Para el análisis de los resultados, el trabajo se dividió en dos (2) etapas 1 y 2 (así mismo, cada una de ellas se subdividió en etapas A y B), con el fin de evaluar el comportamiento de las variables físicas en diferentes profundidades, ventanas paisajísticas (Sistemas) y usos del suelo dominantes. Así mismo, las propiedades físicas evaluadas se clasificaron de acuerdo a sus características en tres grandes grupos: Mecánicos, Volumétricos y Estructurales. Las propiedades físicas mecánicas son aquellas que tienen relación con el grado de penetración del suelo, su nivel de compactación y la resistencia que ejerce el suelo al corte o ruptura. Las propiedades volumétricas son aquellas que se relacionan directamente con el contenido de agua, su retención, almacenamiento y transmisión y finalmente, las propiedades físicas estructurales son aquellas que definen las condiciones de estabilidad, textura y estructura del suelo. Con esto, se pretende determinar cuál es la variabilidad de los datos físicos obtenidos y cómo se separan los sistemas de uso en función de las variables:

- **Etapas 1:** Se divide en dos fases A y B. **Etapas 1-A:** Se realiza el análisis de 135 puntos con nueve (9) variables físicas estudiadas a profundidad de 0-10 cm (27 fincas; 5 puntos por finca). **Etapas 1-B:** Se realiza análisis de 27 puntos con nueve (9) variables físicas obtenidas en campo a profundidad de 0-10 cm (27 fincas; 1 punto central de los 5 puntos).
- **Etapas 2:** Se divide en dos fases A y B. **Etapas 2-A:** Se realiza el análisis de 27 puntos con siete (7) variables físicas estudiadas a profundidades de 0-10, 10-15 y 20-40 cm (27 fincas; 1 punto central de los 5 puntos). **Etapas 2-**

**B:** Se realiza el análisis de 27 puntos con siete (7) variables físicas obtenidas en campo a profundidad de 0-10 cm (27 fincas; 1 punto central de los 5 puntos).

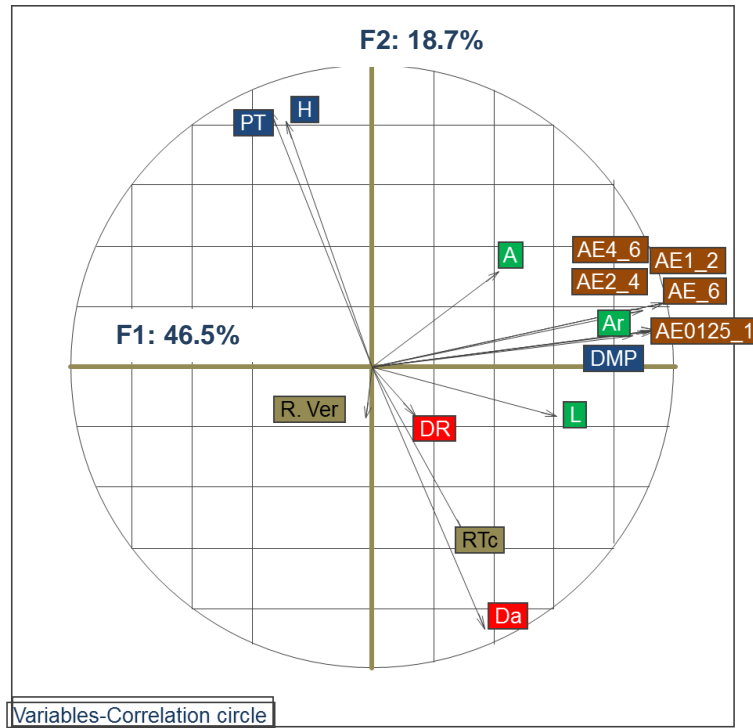
## 4.1. Análisis de la Etapa 1-A

El análisis de la etapa 1-A se centra en la evaluación de los resultados obtenidos para las características mecánicas, volumétricas y estructurales y cómo estas varían de acuerdo con los sistemas de uso del suelo. En esta etapa se evaluaron 135 puntos a profundidad de 0-10 cm. Las variables a evaluar son:

- **Mecánico** (densidad aparente (Da), resistencia tangencial al corte (RTC), resistencia vertical a la penetración (RVP)).
- **Volumétrico** (porosidad total (PT), humedad (H), densidad real (Dr)).
- **Estructural** (textura, estabilidad de agregados (E.A), diámetro medio ponderado (DMP)).

### 4.1.1. Análisis de componentes principales ACP (Etapa 1-A: 135 puntos 0-10 cm y 9 variables)

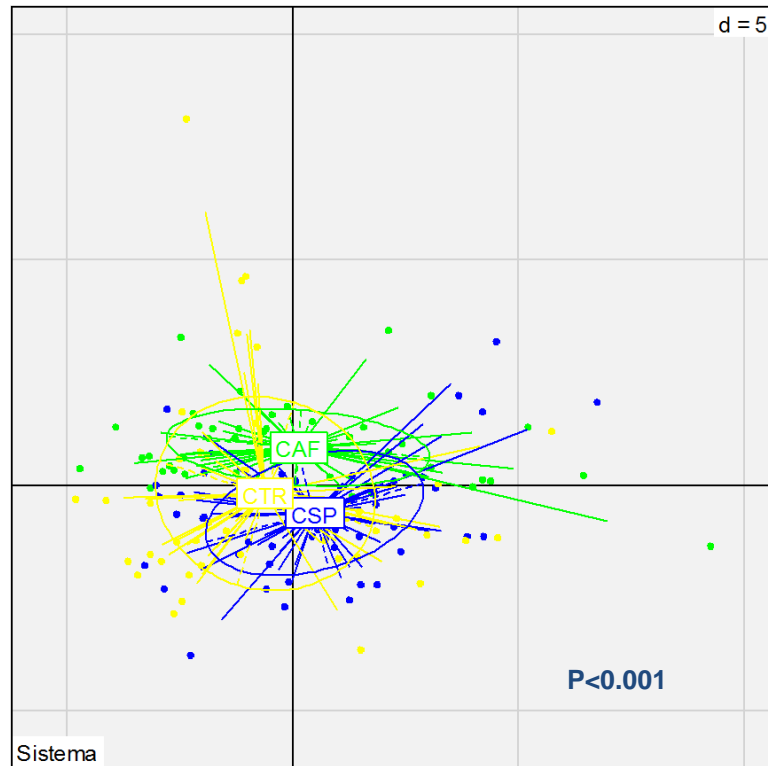
Los factores 1 y 2 del ACP explican el 65.2% de la variabilidad de los datos., El factor 1 explica el 46.5% de la variabilidad de los datos y separa los sistemas de uso del suelo en función de las variables: estabilidad de agregados, diámetro medio ponderado y textura. El Factor 2 explica el 18.7% y separa los usos en función de las variables: porosidad total y la humedad opuestas a la resistencia tangencial al corte y la densidad aparente (Figura 13).



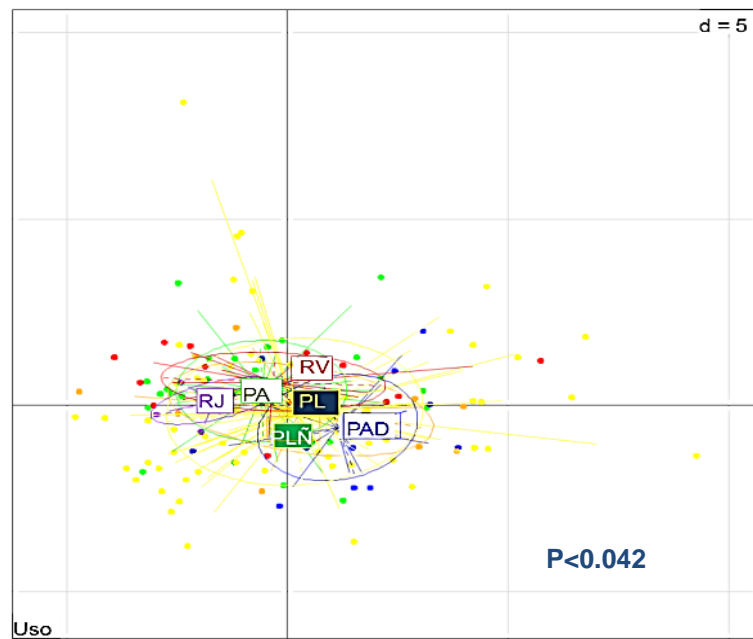
A: Arena, L: Limo, Ar: Arcilla, DR: Densidad Real, Da: Densidad Aparente, RTc: Resistencia Tangencial al Corte, R. Ver: Resistencia Vertical a la Penetración, PT: Porosidad Total, H: Humedad, DMP: Diámetro Medio Ponderado, AE0125\_1: Estabilidad de Agregados Tamiz 0.125 – 1 mm, AE1\_2: Estabilidad de Agregados Tamiz 1 - 2 mm, AE2\_4: Estabilidad de Agregados Tamiz 2 - 4 mm, AE4\_6: Estabilidad de Agregados Tamiz 4 - 6 mm, AE\_6: Estabilidad de Agregados Tamiz >6 mm.

**Figura 13. Análisis de Componentes Principales ACP, Correlación de Variables y valor de la explicación de los Factores 1 y 2.**

La Figura 14 (a) ilustra cómo el análisis de componentes principales ACP separó en forma significativa ( $p < 0.001$ ) las ventanas paisajísticas Tradicional CTR, Silvopastoril CSP y Agroforestal CAF. En la figura 14 (b) se observa la separación significativa ( $p < 0.042$ ) de los diferentes usos del suelo: Pasto Limpio PL, Pasto con Árboles Dispersos PAD, Pasto con Leñosas PLÑ, Barbecho Joven RJ, Barbecho Viejo RV y Sistema Agroforestal PA, en función de las variables físicas.



14 (a) Ventanas Paisajísticas (Sistemas)



14 (b). Usos del Suelo

**Figura 14. Análisis de componentes principales (a) distribución por ventanas paisajísticas (Sistemas) y (b) usos del suelo.**

## 4.1.2. Análisis de las Propiedades Físicas Mecánicas

### 4.1.2.1. Densidad Aparente

Los resultados obtenidos en densidad aparente se hallaron más altos en el sistema agroforestal hasta  $1.4 \text{ gr/cm}^3$ , mientras los resultados más bajos se presentaron en el sistema tradicional con  $0.61 \text{ gr/cm}^3$  (Tabla 1). De esta manera, La figura 15 ilustra las gráficas de Box Plot, donde se detalla el comportamiento de la Da del suelo en cuanto a las ventanas paisajísticas (Sistemas) y los diferentes usos del suelo.

**Tabla 1. Propiedades Físicas (Mecánicas) del suelo: D. Aparente ( $\text{gr/cm}^3$ ), RTC (kPa) y RVP ( $\text{Kgf/cm}^2$ ).**

| VARIABLE                                   | PROFUNDIDAD | R*<br>M**<br>D. S*** | SISTEMA<br>TRADICIONAL<br>n <sup>1</sup> =45 | SISTEMA<br>SILVOPASTORIL<br>n <sup>2</sup> =45 | SISTEMA<br>AGROFORESTAL<br>n <sup>3</sup> =45 |
|--|-------------|----------------------|--|--|---|
| <b>D. APARENTE</b><br>( $\text{gr/cm}^3$ ) | 0-10        | R*                   | 0.61 - 1.33                                  | 0.96 - 1.26                                    | 0.91 - 1.40                                   |
|  |             | M**                  | 1.07   | 1.12   | 1.06  |
|  |             | D. S***              | 0.10   | 0.08   | 0.08  |
| <b>RTC</b><br>(kPa)                        | 0-10        | R*                   | 18.76 - 81.84                                | 34.09 - 95.01                                  | 29.51 - 78.59                                 |
|  |             | M**                  | 65.68  | 66.39  | 50.99   |
|  |             | D. S***              | 12.00  | 12.30  | 11.73   |
| <b>RVP</b><br>( $\text{Kgf/cm}^2$ )        | 0-10        | R*                   | 18.17 - 44.75                                | 17.92 - 42.83                                  | 18.67 - 51.00                                 |
|  |             | M**                  | 26.09  | 26.91  | 27.23   |
|  |             | D. S***              | 6.21   | 5.93   | 5.66  |

R\*= Rango; M\*\*= Media; D.S\*\*\*= Desviación estándar; n=45= Número de Muestras por Ventana

Figura 15 (a). La ventana agroforestal (CAF) tuvo la menor variabilidad en los datos de Da, el 75% de los datos tuvieron una Da inferior a  $1.1 \text{ g/cm}^3$ , contrario a esto, el sistema tradicional (CTR) tuvo datos más dispersos y el 75% de los datos tuvieron un valor inferior a  $1.2 \text{ g/cm}^3$ . Figura 15 (b). El uso barbecho joven (RJ) presentó la menor variabilidad en los datos de Da, el 75% de los datos tuvieron una Da menor de  $1.1 \text{ g/cm}^3$ , mientras que el uso pasto limpio (PL) tuvo los datos más dispersos y el 75% de los datos fue inferior a  $1.2 \text{ g/cm}^3$ , presentando valores extremos alrededor de  $0.61 \text{ g/cm}^3$ .

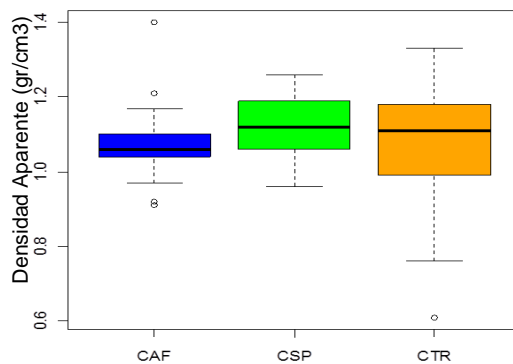


Figura 15 (a) Ventanas Paisajísticas

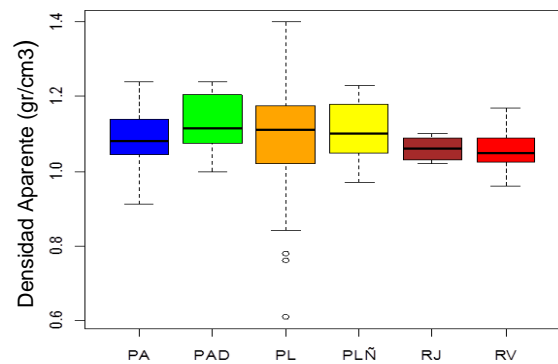


Figura 15 (b) Usos del suelo

**Figura 15. Box Plot Densidad Aparente en ventanas paisajísticas y usos del suelo.**

#### ▪ 4.1.2.2. Resistencia Tangencial al Corte

La resistencia tangencial al corte presentó valores altos en el sistema silvopastoril hasta 95.01 kPa, mientras los más bajos en los sistema tradicional con 18.76 kPa. (**Tabla 1**). En este sentido, La figura 16 ilustra las gráficas de Box Plot, donde se detalla el comportamiento de la RTc del suelo en cuanto a las ventanas paisajísticas (Sistemas) y los diferentes usos del suelo.

Figura 16 (a). La ventana tradicional (CTR) tuvo la menor variabilidad en los datos de RTc, el 75% de los datos tuvieron una RTc inferior a 80 kPa, presentando valores extremos de 18.76 kPa. Contrario a esto, el sistema silvopastoril (CSP) tuvo datos más dispersos y el 75% de los datos tuvieron un valor inferior a 80 kPa, y el 50% de los datos estuvieron por debajo de 70 kPa. Figura 16 (b). El uso barbecho joven (RJ) presentó la menor variabilidad en los datos de RTc, el 75% de los datos tuvieron una RTc de 60 kPa, mientras que el uso pasto con árboles dispersos (PAD) tuvo los datos más dispersos y el 75% de los datos fue inferior a 80 kPa.

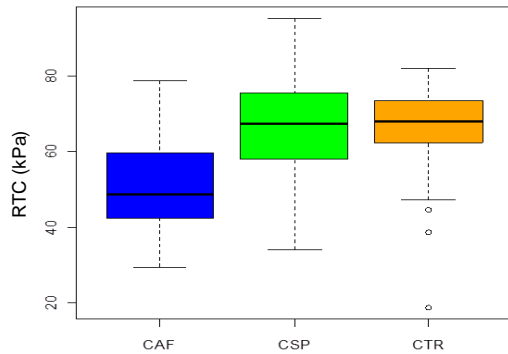


Figura 16 (a) Ventanas Paisajísticas

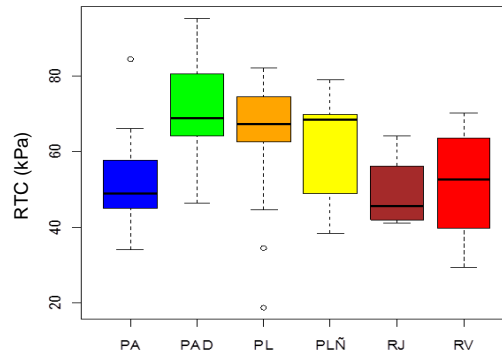


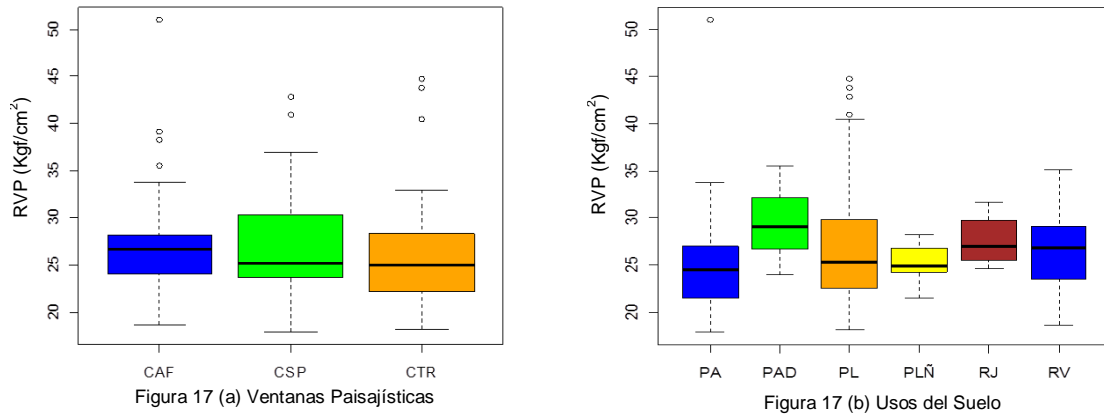
Figura 16 (b) Usos del Suelo

**Figura 16. Box Plot Resistencia Tangencial al Corte  $RT_c$  del suelo en diferentes ventanas paisajísticas y usos.**

#### ▪ 4.1.2.3. Resistencia Vertical a la Penetración

La resistencia vertical a la penetración RVP mostró los valores más altos en el sistema agroforestal hasta  $51 \text{ Kg/cm}^2$ , mientras los más bajos en los sistema silvopastoril con  $17.92 \text{ Kg/cm}^2$  (**Tabla 1**). Por su parte, La Figura 17 ilustra las gráficas de Box Plot, donde se detalla el comportamiento de la RVP del suelo en cuanto a las ventanas paisajísticas (Sistemas) y los diferentes usos del suelo.

Figura 17 (a). La ventana agroforestal (CAF) tuvo la menor variabilidad en los datos de RVP, el 75% de los datos tuvieron una RVP inferior a  $30 \text{ Kg/cm}^2$ , presentando valores extremos máximos de  $51 \text{ Kg/cm}^2$ . Contraria a esta condición, el sistema silvopastoril (CSP) tuvo datos más dispersos y el 75% de los datos tuvieron un valor inferior a  $32 \text{ Kg/cm}^2$ , el 50% de los datos estuvieron por debajo de  $25 \text{ Kg/cm}^2$ . Figura 17 (b). El uso pasto con leñosas (PLÑ) presentó la menor variabilidad en los datos de RVP, el 75% de los datos tuvieron una RVP de  $27 \text{ Kg/cm}^2$ , mientras que el uso pasto limpio (PL) tuvo los datos más dispersos y el 75% de los datos fue inferior a  $30 \text{ Kg/cm}^2$ , con valores extremos máximos de  $45 \text{ Kg/cm}^2$ .



**Figura 17. Box Plot Resistencia Vertical a la Penetración RVP del suelo en diferentes ventanas paisajísticas y usos.**

### 4.1.3. Análisis de las Propiedades Físicas Volumétricas

#### 4.1.3.1. Porosidad Total

El análisis de la porosidad total reportó que los valores más altos se presentaron en el sistema tradicional 75%, mientras los más bajos en el sistema agroforestal con 46.15% (**Tabla 2**). La figura 18 ilustra las gráficas de Box Plot, donde se detalla el comportamiento de la porosidad total del suelo en cuanto a las ventanas paisajísticas (Sistemas) y los diferentes usos del suelo.

**Tabla 2. Propiedades Físicas (Volumétricas) del suelo: Porosidad Total (%), Humedad (%) y D. Real (gr/cm<sup>3</sup>).**

| VARIABLE                               | PROFUNDIDAD | R*<br>M**<br>D. S*** | SISTEMA<br>TRADICIONAL<br>n <sup>1</sup> =45 | SISTEMA<br>SILVOPASTORIL<br>n <sup>2</sup> =45 | SISTEMA<br>AGROFORESTAL<br>n <sup>3</sup> =45 |
|--|-------------|----------------------|--|--|---|
| <b>POROSIDAD<br/>TOTAL<br/>(%)</b>     | 0-10        | R*                   | 48.85 - 75.00                                | 51.19 - 63.64                                  | 46.15 - 64.34                                 |
|  |             | M**                  | 58.49  | 56.93  | 58.51   |
|  |             | D. S***              | 5.52   | 2.94   | 3.09  |
| <b>HUMEDAD<br/>(%)</b>                 | 0-10        | R*                   | 18.71 - 50.81                                | 20.96 - 39.60                                  | 20.71 - 41.50                                 |
|  |             | M**                  | 28.77  | 27.57  | 28.26   |
|  |             | D. S***              | 4.46   | 3.91   | 3.55  |
| <b>D. REAL<br/>(gr/cm<sup>3</sup>)</b> | 0-10        | R*                   | 2.42 - 2.66                                  | 2.43 - 2.71                                    | 2.45 - 2.67                                   |
|  |             | M**                  | 2.58   | 2.61   | 2.58  |
|  |             | D. S***              | 0.06   | 0.06   | 0.05  |

R\*= Rango; M\*\*= Media; D.S\*\*\*= Desviación estándar; n=45= Número de Muestras por Ventana

Figura 18 (a). La ventana agroforestal (CAF) tuvo la menor variabilidad en los datos de porosidad total, el 75% de los datos tuvieron una porosidad total inferior a 60%, con un valor máximo extremo de 64.34%. Contrario a esto, el sistema tradicional (CTR) tuvo datos más dispersos y el 75% de los datos tuvieron un valor inferior a 62%, presentando valores máximos extremos de 75%. Figura 18 (b). El uso barbecho joven (RJ) presentó la menor variabilidad en los datos de porosidad total, el 75% de los datos tuvieron una porosidad total menor de 62%, mientras que el uso pasto limpio (PL) tuvo los datos más dispersos y el 75% de los datos fue inferior a 61%, presentando valores extremos de 75%.

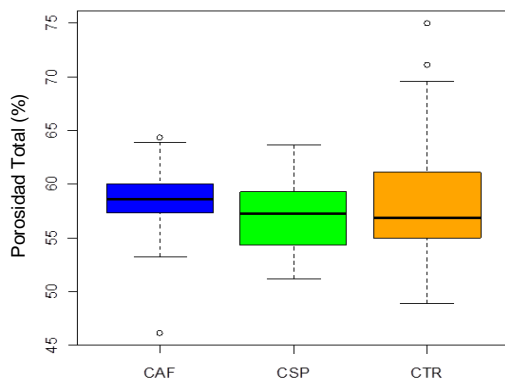


Figura 18(a) Ventanas Paisajísticas

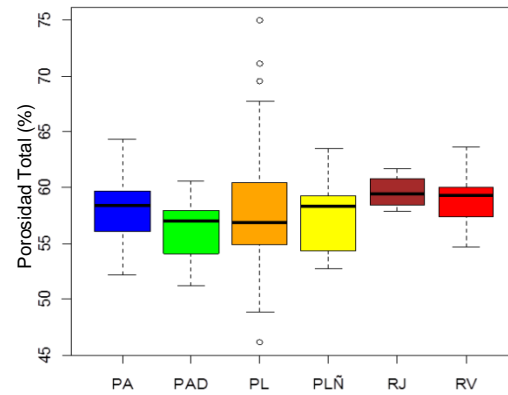


Figura 18(b) Usos del Suelo

**Figura 18. Box Plot Porosidad Total del suelo en diferentes ventanas paisajísticas y usos.**

#### 4.1.3.2. Humedad Gravimétrica

La humedad gravimétrica presentó los valores más altos en el sistema tradicional hasta 50.81%, al igual que los más bajos con 18.71%. (**Tabla 2**). La figura 19 ilustra las gráficas de Box Plot, donde se detalla el comportamiento de la humedad gravimétrica del suelo en cuanto a las ventanas paisajísticas (Sistemas) y los diferentes usos del suelo.

Figura 19 (a). La ventana agroforestal (CAF) tuvo la menor variabilidad en los datos de humedad gravimétrica, el 75% de los datos tuvieron una humedad gravimétrica inferior a 31%, con un valor máximo extremo de 41.5%. Contrario a esto, el sistema tradicional (CTR) tuvo datos más dispersos y el 75% de los datos tuvieron un valor inferior a 30%, presentando valores máximos extremos de 50.81%. Figura 19 (b). El uso barbecho viejo (RJ) presentó la menor variabilidad en los datos de humedad gravimétrica, el 75% de los datos tuvieron una humedad gravimétrica menor de 30%, mientras que el uso pasto limpio (PL) tuvo los datos

más dispersos y el 75% de los datos fue inferior a 30%, presentando valores extremos por encima de 50%.

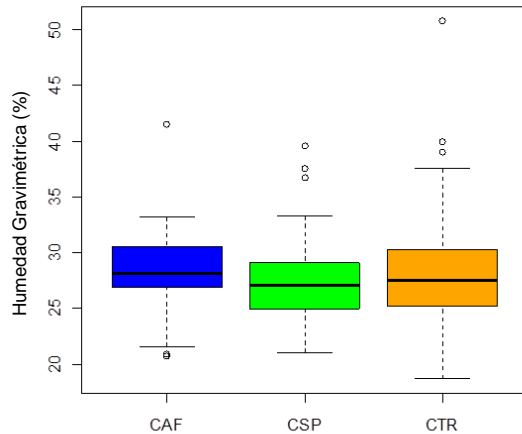


Figura 19 (a) Ventanas Paisajísticas

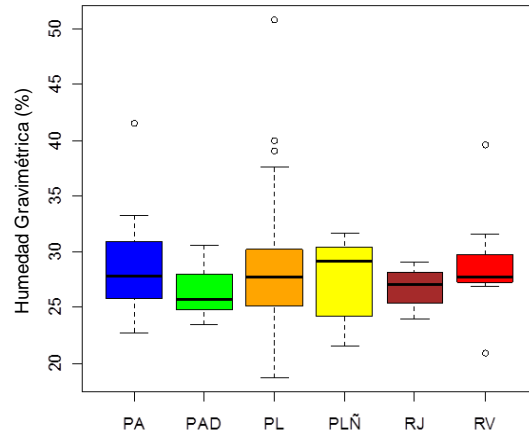
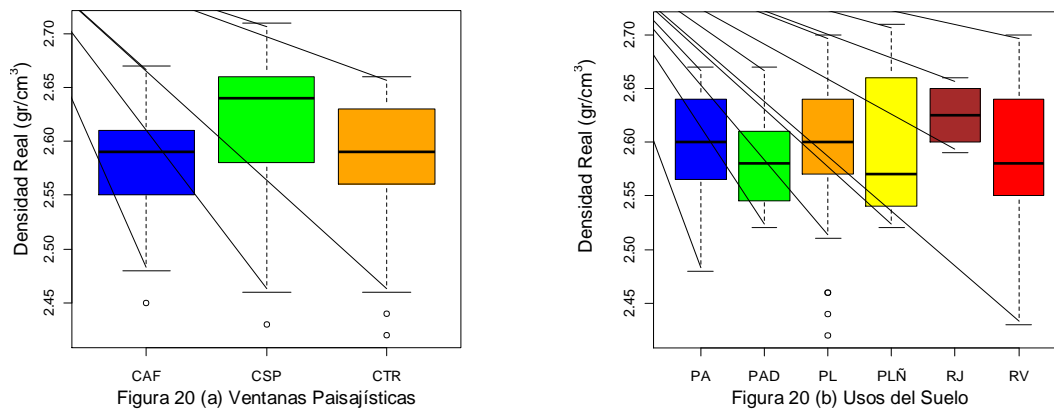


Figura 19 (b) Usos del Suelo

**Figura 19. Box Plot de Humedad Gravimétrica del suelo en diferentes ventanas paisajísticas y usos.**

#### ▪ 4.1.3.3. Densidad Real

El análisis de la densidad real permitió encontrar que los valores más altos se presentaron en el sistema silvopastoril hasta  $2.71 \text{ gr/cm}^3$ , mientras los más bajos en el sistema tradicional  $2.42 \text{ gr/cm}^3$  (**Tabla 2**). La Figura 20 ilustra las gráficas de Box Plot, donde se detalla el comportamiento de la densidad real del suelo en cuanto a las ventanas paisajísticas (Sistemas) y los diferentes usos del suelo.



**Figura 20. Box Plot de Densidad Real del suelo en diferentes ventanas paisajísticas y usos.**

La ventana agroforestal (CAF) Figura 20 (a) tuvo la menor variabilidad en los datos de densidad real, el 75% de los datos tuvieron una densidad real inferior a  $2.62 \text{ gr/cm}^3$ , contrario a esto, el sistema silvopastoril (CSP) tuvo datos más dispersos y el 75% de los datos tuvieron un valor inferior a  $2.66 \text{ gr/cm}^3$ , presentando valores mínimos extremos de  $2.43 \text{ gr/cm}^3$ . Figura 20 (b). El uso barbecho joven (RJ) presentó la menor variabilidad en los datos de densidad real, el 75% de los datos tuvieron una densidad real. menor de  $2.65 \text{ gr/cm}^3$ , mientras que el uso pasto con leñosas (PLÑ) tuvo los datos más dispersos y el 75% de los datos fue inferior a  $2.66 \text{ gr/cm}^3$ .

#### 4.1.4. Análisis de las Propiedades Físicas Estructurales

##### 4.1.4.1. Textura

###### 4.1.4.1.1. Contenido de Arena

En cuanto al contenido de arena, los valores más altos se reportaron en el sistema agroforestal (CAF) con 53.04%, mientras los más bajos en el sistema

tradicional (CTR) 1.33%. (Tabla 3). La figura 21 ilustra las gráficas de Box Plot, donde se detalla el comportamiento del contenido de arena (%A) del suelo en cuanto a las ventanas paisajísticas (Sistemas) y los diferentes usos del suelo.

**Tabla 3. Propiedades Físicas (Estructurales) del suelo: Textura (%A-L-Ar), Estabilidad de Agregados (mm) y Diámetro Medio Ponderado (%).**

| VARIABLE                            | PARAMETRO  | R*             | SISTEMA TRADICIONAL | SISTEMA SILVOPASTORIL | SISTEMA AGROFORESTAL |
|-------------------------------------|------------|----------------|---------------------|-----------------------|----------------------|
|                                     |            | M**<br>D. S*** | n <sup>1</sup> =45  | n <sup>2</sup> =45    | n <sup>3</sup> =45   |
| TEXTURA<br>Profundidad<br>(0-10 cm) | % A        | R*             | 1.33 - 10.41        | 10.41 - 31.04         | 31.04 - 53.04        |
|                                     |            | M**            | 6.36                | 19.41                 | 39.10                |
|                                     |            | D. S***        | 2.47                | 11.67                 | 6.16                 |
|                                     | % L        | R*             | 17.65 - 61.82       | 32.97 - 60.50         | 11.13 - 39.46        |
|                                     |            | M**            | 36.55               | 46.76                 | 22.77                |
|                                     |            | D. S***        | 10.91               | 13.66                 | 6.63                 |
|                                     | % Ar       | R*             | 24.72 - 63.27       | 34.20 - 65.25         | 14.27 - 59.99        |
|                                     |            | M**            | 41.82               | 44.76                 | 42.43                |
|                                     |            | D. S***        | 7.65                | 6.58                  | 7.52                 |
| E.<br>AGREGADOS<br>(0-10 cm)        | 0,125-1 mm | R*             | 0.33 - 26.21        | 0.74 - 31.73          | 1.23 - 46.38         |
|                                     |            | M**            | 5.79                | 22.52                 | 11.43                |
|                                     |            | D. S***        | 4.93                | 8.01                  | 11.12                |
|                                     | 1-2 mm     | R*             | 0.43 - 22.91        | 0.50 - 30.28          | 1.66 - 29.49         |
|                                     |            | M**            | 7.50                | 19.79                 | 10.59                |
|                                     |            | D. S***        | 6.18                | 6.82                  | 6.67                 |
|                                     | 2-4 mm     | R*             | 0.33 - 25.94        | 0.35 - 18.13          | 1.60 - 31.66         |
|                                     |            | M**            | 9.05                | 17.36                 | 10.0                 |
|                                     |            | D. S***        | 7.19                | 4.76                  | 5.15                 |
|                                     | 4-6 mm     | R*             | 0.43 - 22.91        | 0.50 - 30.28          | 1.66 - 29.49         |
|                                     |            | M**            | 7.50                | 19.79                 | 10.59                |
|                                     |            | D. S***        | 6.18                | 6.82                  | 6.67                 |
| >6 mm                               | R*         | 0.33 - 26.21   | 0.74 - 31.73        | 1.23 - 46.38          |                      |
|                                     | M**        | 5.79           | 22.52               | 11.43                 |                      |
|                                     | D. S***    | 4.93           | 8.01                | 11.12                 |                      |
| DMP<br>(0-10 cm)                    | (%)        | R*             | 0.68 - 6.96         | 2.01 - 6.65           | 1.82 - 6.61          |
|                                     |            | M**            | 5.17                | 9.34                  | 4.53                 |
|                                     |            | D. S***        | 1.37                | 1.38                  | 1.38                 |

R\*= Rango; M\*\*= Media; D.S\*\*\*= Desviación estándar; n=45= Número de Muestras por Ventana

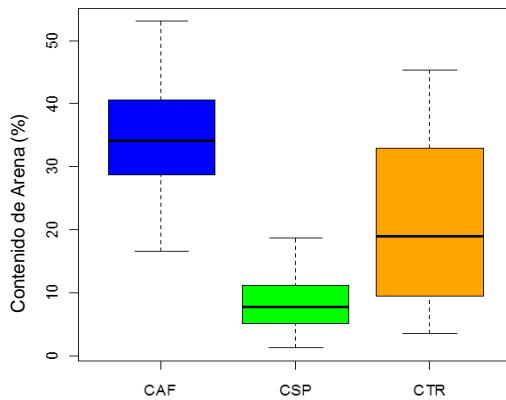


Figura 20(a) Ventanas Paisajísticas

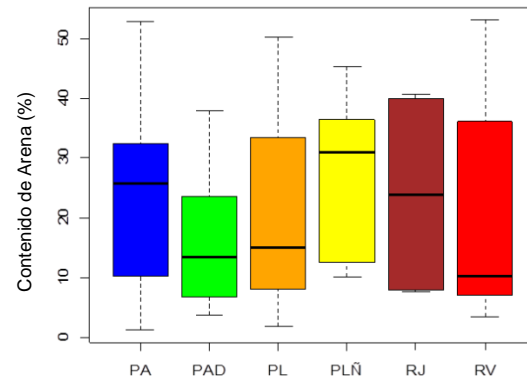


Figura 20(b) Usos del Suelo

### Figura 21. Box Plot Contenido de Arena (A%) en el suelo en diferentes ventanas paisajísticas y usos.

Figura 21 (a). La ventana silvopastoril (CSP) tuvo la menor variabilidad en los datos de Arena (%), el 75% de los datos tuvieron un valor inferior a 11%, contrario a esto, el sistema tradicional (CTR) tuvo datos más dispersos y el 75% de los datos tuvieron un valor inferior a 35%. Figura 21 (b). El uso pasto con árboles dispersos (PAD) presentó la menor variabilidad en los datos de Arena (%), el 75% de los datos tuvieron un Arena (%) menor de 25%, mientras que el uso rastrojo viejo (RV) tuvo los datos más dispersos y el 75% de los datos fue inferior a 38%.

#### 4.1.4.1.2. Contenido de Limo

En cuanto al contenido de limo, los valores más altos se presentaron en el sistema tradicional (CTR) hasta 61.82%, mientras los más bajos en el sistema agroforestal (CAF) 11.13% (**Tabla 3**). La figura 22 ilustra las gráficas de Box Plot, donde se detalla el comportamiento del contenido de limo (L%) del suelo en cuanto a las ventanas paisajísticas (Sistemas) y los diferentes usos del suelo.

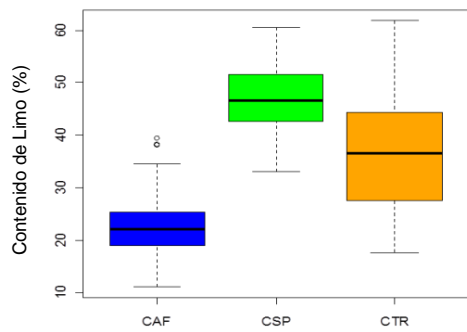


Figura 22 (a) Ventanas Paisajísticas

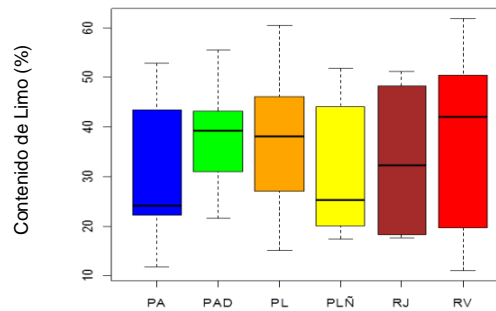


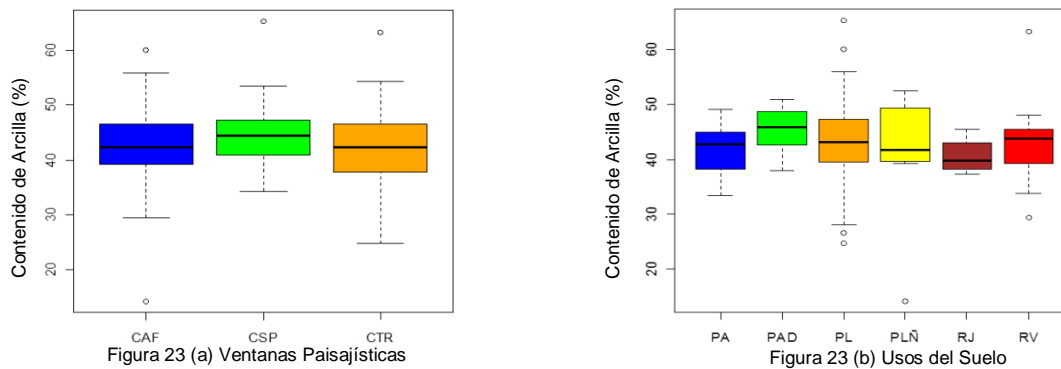
Figura 22 (b) Usos del Suelo

**Figura 22. Box Plot Contenidos de Limo (L%) del suelo en diferentes ventanas paisajísticas y usos.**

Figura 22 (a). La ventana agroforestal (CAF) tuvo la menor variabilidad en los datos de limo, el 75% de los datos tuvieron un valor inferior a 25%, presentando valores extremos máximos de 39.46%. Contrario a esto, el sistema tradicional (CTR) tuvo datos más dispersos y el 75% de los datos tuvieron un valor inferior a 45%. Figura 22 (b). El uso pasto con árboles dispersos (PAD) tuvo la menor dispersión, el 75% de los datos tuvieron un valor inferior a 43%, mientras que el uso rastrojo viejo (RV) presentó la mayor variabilidad en los datos de limo, el 75% de los datos tuvieron un valor menor de 50%.

#### 4.1.4.1.3. Contenido de Arcilla

El contenido de arcilla mostró los valores más altos en el sistema silvopastoril (CSP) hasta 65.25%, mientras los más bajos en el sistema agroforestal (CAF) 14.27% (**Tabla 3**). La figura 23 ilustra las gráficas de Box Plot, donde se detalla el comportamiento del contenido de arcilla (Ar%) del suelo en cuanto a las ventanas paisajísticas (Sistemas) y los diferentes usos del suelo.



**Figura 23. Box Plot Contenido de Arcilla del suelo en diferentes ventanas paisajísticas y usos.**

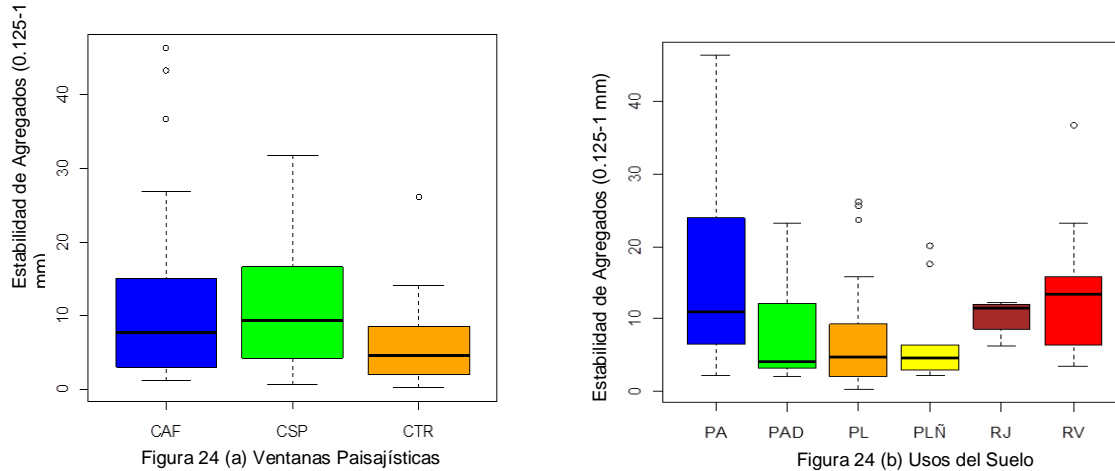
Figura 23 (a). La ventana silvopastoril (CSP) tuvo la menor variabilidad en los datos de arcilla (%), el 75% de los datos tuvieron un valor inferior a 48%, presentando valores extremos máximos de 65.25%. Contrario a esto, el sistema tradicional (CTR) tuvo datos más dispersos y el 75% de los datos tuvieron un valor inferior a 47%. Figura 23 (b). El uso rastrojo viejo (RV) tuvo la menor dispersión, el 75% de los datos tuvieron un valor inferior a 45%, mientras que el uso pasto limpio (PL) presentó la mayor variabilidad en los datos de arcilla (%), el 75% de los datos tuvieron un valor menor de 48% en el contenido de arcilla, presentando valores máximos extremos de arcilla de 65.25%.

#### ▪ 4.1.4.2. Estabilidad de Agregados

##### 4.1.4.2.1. Agregados Estables 0.125 – 1 mm

La estabilidad de agregados en el rango (0.125 – 1 mm) mostró los valores más altos en el sistema agroforestal (CAF) con 46.38%, mientras los más bajos en el sistema tradicional (CTR) 0.33% (**Tabla 3**). La figura 24 ilustra las gráficas de Box Plot, donde se detalla el comportamiento de los agregados estables (0.125 – 1

mm) del suelo en cuanto a las ventanas paisajísticas (Sistemas) y los diferentes usos del suelo.



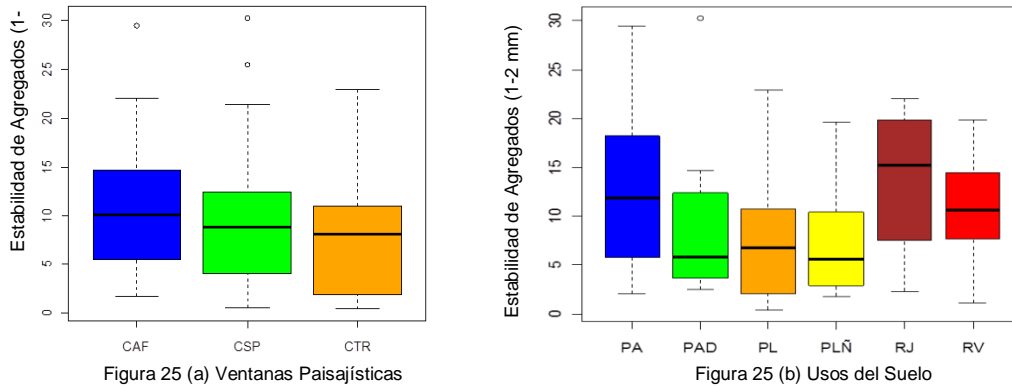
**Figura 24. Cambios en los Agregados Estables del suelo (0.125 – 1 mm) en diferentes ventanas paisajísticas y usos.**

Figura 24 (a). La ventana tradicional (CTR) tuvo la menor variabilidad en los datos de agregados estables (0.125 – 1 mm), el 75% de los datos tuvieron un valor inferior a 10%, presentando valores extremos máximos de 26.21%. Contrario a esto, el sistema agroforestal (CAF) tuvo datos más dispersos y el 75% de los datos tuvieron un valor inferior a 20%. Figura 24 (b). El uso pasto con leñosas (PLÑ) tuvo la menor dispersión, el 75% de los datos tuvieron un valor inferior a 9%, mientras que el uso agroforestal (PA) presentó la mayor variabilidad en los datos de agregados estables. (0.125 – 1 mm), el 75% de los datos tuvieron un valor de agregados estables (0.125 – 1 mm) menor al 25%.

#### 4.1.4.2.2. Agregados Estables 1 - 2 mm

En el análisis de los agregados estables entre 1-2 mm, se reportaron los valores más altos en el sistema silvopastoril (CSP) con 30.28%, mientras los más bajos

en el sistema tradicional (CTR) 0.43% (**Tabla 3**). La figura 25 ilustra las gráficas de Box Plot, donde se detalla el comportamiento de la estabilidad de agregados (1-2 mm) del suelo en cuanto a las ventanas paisajísticas (Sistemas) y los diferentes usos del suelo.



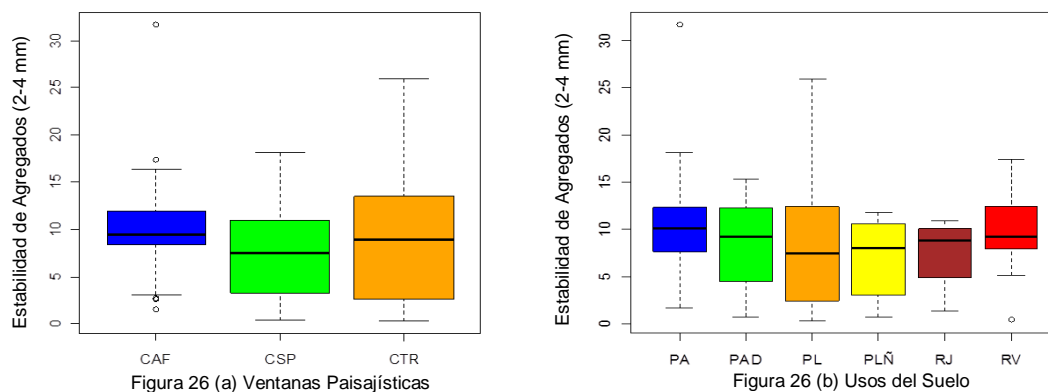
**Figura 25. Cambios en los Agregados Estables (1 - 2 mm) en diferentes ventanas paisajísticas y usos del suelo.**

Figura 25 (a). La ventana silvopastoril (CSP) tuvo la menor variabilidad en los datos de E.A. (1 - 2 mm), el 75% de los datos tuvieron un valor inferior a 14%, presentando valores extremos máximos de 30.28%. Contrario a esto, el sistema tradicional (CTR) tuvo datos más dispersos y el 75% de los datos tuvieron un valor inferior a 12%. Figura 25 (b). El uso rastrojo viejo (RV) tuvo la menor dispersión, el 75% de los datos tuvieron un valor inferior a 15%, mientras que el uso agroforestal (PA) presentó la mayor variabilidad en los datos de E.A. (1 - 2 mm), el 75% de los datos tuvieron un % E.A. (1 - 2 mm) menor de 20%.

#### 4.1.4.2.3. Agregados Estables 2 - 4 mm

Los agregados estables entre 2-4 mm, mostró los valores más altos en el sistema agroforestal (CAF) con 31.66%, mientras los más bajos en el sistema tradicional (CTR) 0.33% (**Tabla 3**). La figura 26 ilustra las gráficas de Box Plot, donde se

detalla el comportamiento de la estabilidad de agregados (2 - 4 mm) del suelo en cuanto a las ventanas paisajísticas (Sistemas) y los diferentes usos del suelo.



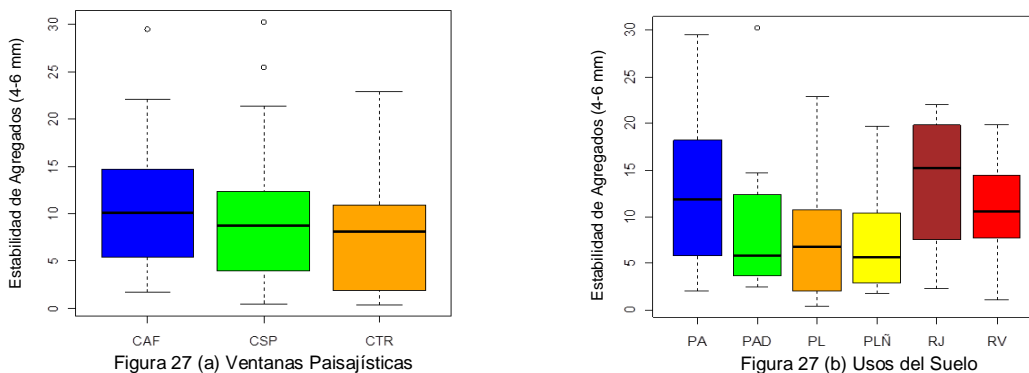
**Figura 26. Cambio en los Agregados Estables del suelo (2 - 4 mm) en diferentes ventanas paisajísticas y usos del suelo.**

Figura 26 (a). La ventana agroforestal (CAF) tuvo la menor variabilidad en los datos de agregados estables (2 - 4 mm), el 75% de los datos tuvieron un valor inferior a 13%, presentando valores extremos máximos de 31.66%. Contrario a esto, el sistema tradicional (CTR) tuvo datos más dispersos y el 75% de los datos tuvieron un valor inferior a 15%. Figura 26 (b). El uso rastrojo viejo (RV) tuvo la menor dispersión, el 75% de los datos tuvieron un valor inferior a 14%, mientras que el uso pasto limpio (PL) presentó la mayor variabilidad en los datos de agregados estables (2 - 4 mm), el 75% de los datos tuvieron un valor de agregados estables. (2 - 4 mm) menor de 13%.

#### 4.1.4.2.4. Agregados Estables 4 - 6 mm

La estabilidad de agregados en el rango 4-6 mm, mostró que los resultados más altos se presentaron en el sistema silvopastoril (CSP) con 30.28%, mientras los más bajos en el sistema tradicional (CTR) con 0.43% (**Tabla 3**). En este sentido,

La figura 27 ilustra las gráficas de Box Plot, donde se detalla el comportamiento de la estabilidad de agregados (4 - 6 mm) del suelo en cuanto a las ventanas paisajísticas (Sistemas) y los diferentes usos del suelo.



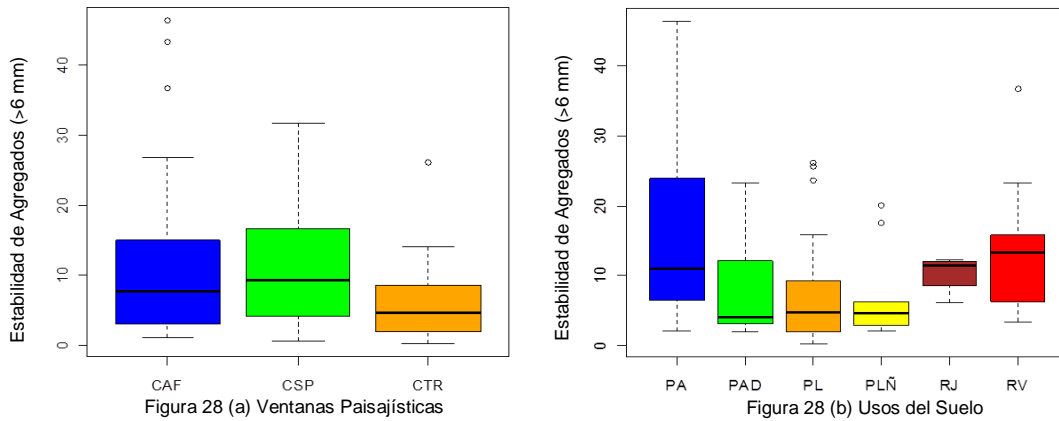
**Figura 27. Cambio en los Agregados Estables del suelo 4 - 6 mm en diferentes ventanas paisajísticas y usos.**

Figura 27 (a). La ventana agroforestal (CAF) tuvo la menor variabilidad en los datos de estabilidad de agregados (4 - 6 mm), el 75% de los datos tuvieron un valor inferior a 15%, presentando valores extremos máximos de 29.49%. Contrario a esto, el sistema tradicional (CTR) tuvo datos más dispersos y el 75% de los datos tuvieron un valor inferior a 13%. Figura 27 (b). El uso rastrojo viejo (RV) tuvo la menor dispersión, el 75% de los datos tuvieron un valor inferior a 14%, mientras que el uso agroforestal (PA) presentó la mayor variabilidad en los datos de estabilidad de agregados (4 - 6 mm), el 75% de los datos tuvieron un valor de agregados estables (4 - 6 mm) menor de 19%.

#### 4.1.4.2.5. Agregados Estables > 6 mm

Los resultados para agregados estables mayores de 6 mm presentaron los valores más altos en el sistema agroforestal (CAF) con 46.38%, mientras los más bajos en el sistema tradicional (CTR) 0.33% (**Tabla 3**). La figura 28 ilustra las

gráficas de Box Plot, donde se detalla el comportamiento de la estabilidad de agregados (> 6 mm) del suelo en cuanto a las ventanas paisajísticas (Sistemas) y los diferentes usos del suelo.



**Figura 28. Cambios en los agregados estables del suelo (> 6 mm) en diferentes ventanas paisajísticas y usos.**

Figura 28 (a). La ventana tradicional (CTR) tuvo la menor variabilidad en los datos de agregados estables (> 6 mm), el 75% de los datos tuvieron un valor inferior a 10%, presentando valores extremos máximos de 26.21%. Contrario a esto, el sistema silvopastoril (CSP) tuvo datos más dispersos y el 75% de los datos tuvieron un valor inferior a 20%. Figura 28 (b). El uso pasto con leñosas (PLÑ) tuvo la menor dispersión, el 75% de los datos tuvieron un valor inferior a 8%, mientras que el uso agroforestal (PA) presentó la mayor variabilidad en los datos de agregados estables (> 6 mm), el 75% de los datos tuvieron un valor de estabilidad de agregados (> 6 mm) menor de 25%.

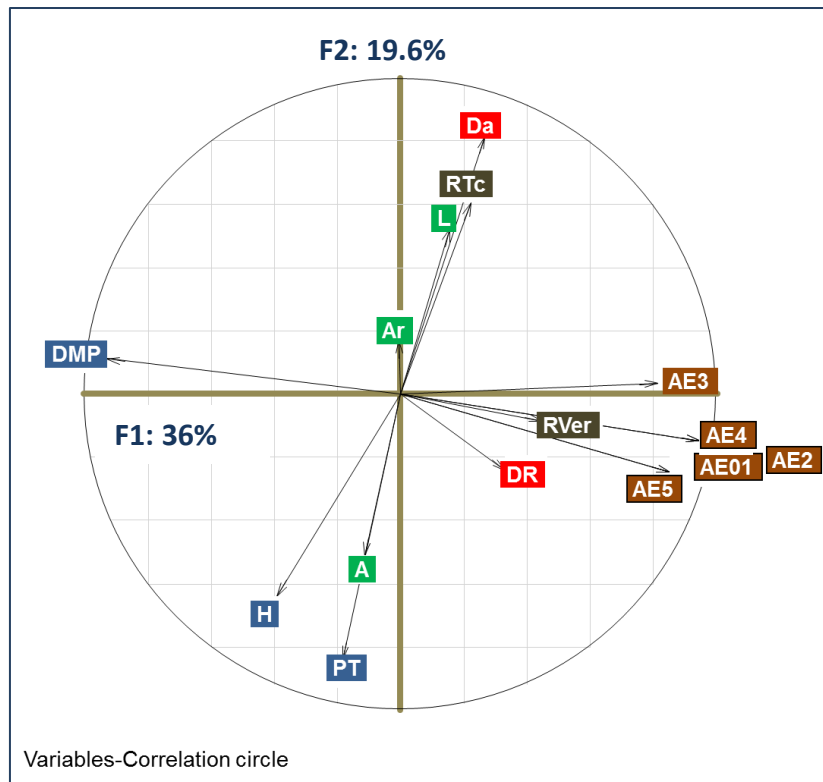
## 4.2. Análisis de la Etapa 1-B

En la etapa 1-B se estudiaron 27 puntos a profundidad de 0-10 cm. Las variables a evaluar son:

- **Mecánico** (densidad aparente ( $D_a$ ), resistencia tangencial al corte (RTC), resistencia vertical a la penetración (RVP)).
- **Volumétrico** (porosidad total (PT), humedad (H), densidad real ( $D_r$ )).
- **Estructural** (textura, estabilidad de agregados (E.A), diámetro medio ponderado (DMP)).

#### **4.2.1. Análisis de componentes principales ACP (Etapa 1-B: 27 puntos 0-10 cm y 9 variables)**

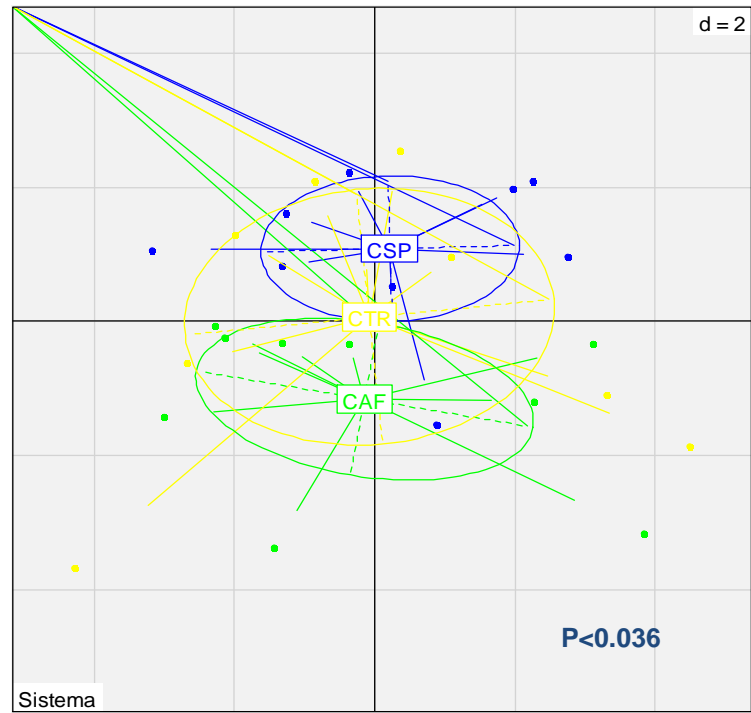
Los factores 1 y 2 del análisis de componentes principales explican el 55.6% de la variabilidad total de los datos. El factor 1 (36%) separa los sistemas de uso del suelo en función de las variables: estabilidad de agregados, densidad real y resistencia vertical a la penetración y el diámetro medio ponderado opuesto a las anteriores variables; por su parte, el Factor 2 (19.6%) separa los usos del suelo en función de las variables: densidad aparente, resistencia tangencial al corte, limo y arcilla opuestos a contenido de arena, humedad y porosidad total (Figura 29).



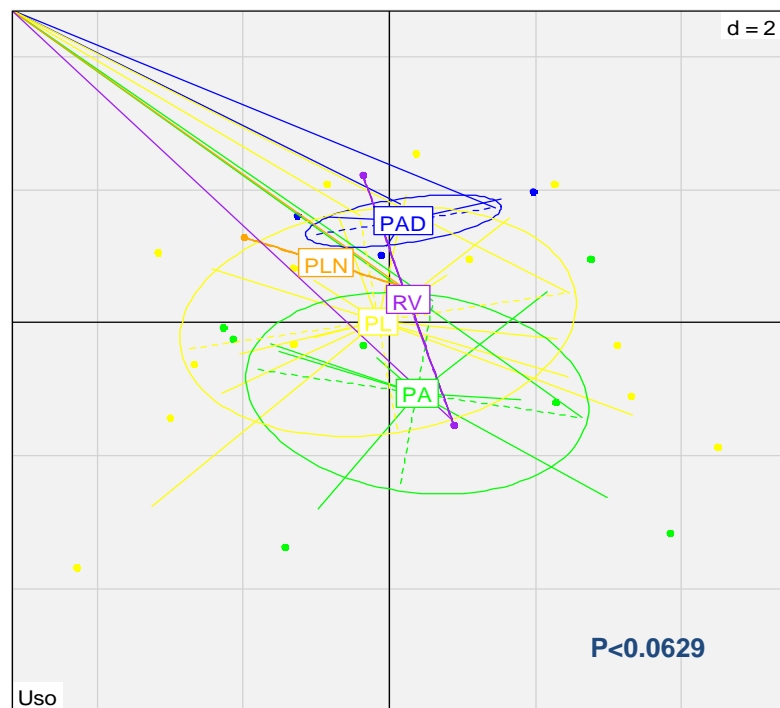
A: Arena, L: Limo, Ar: Arcilla, DR: Densidad Real, Da: Densidad Aparente, RTc: Resistencia Tangencial al Corte, R. Ver: Resistencia Vertical a la Penetración, PT: Porosidad Total, H: Humedad, DMP: Diámetro Medio Ponderado, AE01: Estabilidad de Agregados Tamiz 0.125 - 1 mm, AE2: Estabilidad de Agregados Tamiz 1 - 2 mm, AE3: Estabilidad de Agregados Tamiz 2 - 4 mm, AE4: Estabilidad de Agregados Tamiz 4 - 6 mm, AE5: Estabilidad de Agregados Tamiz >6 mm.

**Figura 29. Análisis de Componentes Principales ACP, Correlación de Variables y valor de la explicación de los Factores 1 y 2.**

La figura 30 (a) ilustra cómo el análisis de componentes principales ACP separó en forma significativa ( $p < 0.036$ ) las ventanas paisajísticas Tradicional CTR, Silvopastoril CSP y Agroforestal CAF. En la figura 30 (b) se observa que hay separación significativa ( $p < 0.0629$ ) entre los diferentes usos del suelo: Pasto Limpio PL, Pasto con Árboles Dispersos PAD, Pasto con Leñosas PLÑ, Barbecho Viejo RV y Sistema Agroforestal PA, en función de las variables físicas.



30 (a) Ventanas Paisajísticas



30 (b) Usos del Suelo

**Figura 30. Análisis de componentes principales (a) distribución por ventanas paisajísticas (Sistemas) y (b) usos del suelo.**

### 4.2.2. Análisis de las Propiedades Físicas Mecánicas

#### 4.2.2.1. Densidad Aparente

La densidad aparente presentó los valores más altos en el sistema silvopastoril hasta 1.3 gr/cm<sup>3</sup>, mientras los más bajos en el sistema tradicional con 0.8 gr/cm<sup>3</sup> (Tabla 4). La figura 31 ilustra las gráficas de Box Plot, donde se detalla el comportamiento de la Da del suelo en cuanto a las ventanas paisajísticas (Sistemas) y los diferentes usos del suelo.

Tabla 4. Propiedades Físicas (Mecánicas) del suelo: D. Aparente (gr/cm<sup>3</sup>), RTC (kPa) y RVP (Kgf/cm<sup>2</sup>).

| VARIABLE                          | PROFUNDIDAD | R*<br>M**<br>D. S*** | SISTEMA TRADICIONAL<br>n <sup>1</sup> =9 | SISTEMA SILVOPASTORIL<br>n <sup>2</sup> =9 | SISTEMA AGROFORESTAL<br>n <sup>3</sup> =9 |
|-----------------------------------|-------------|----------------------|--|--|---|
| D. APARENTE (gr/cm <sup>3</sup> ) | 0-10        | R*                   | 0.8-1.2                                  | 1.1-1.3                                    | 0.9-1.2                                   |
|                                   |             | M**                  | 1.06                                     | 1.13                                       | 1.08                                      |
|                                   |             | D. S***              | 0.13                                     | 0.09                                       | 0.08                                      |
| RTC (kPa)                         | 0-10        | R*                   | 47.1-77.9                                | 48.7-95.0                                  | 34.5-58.3                                 |
|                                   |             | M**                  | 68.54                                    | 71.01                                      | 46.25                                     |
|                                   |             | D. S***              | 9.65                                     | 12.64                                      | 6.62                                      |
| RVP (Kgf/cm <sup>2</sup> )        | 0-10        | R*                   | 19.8-44.8                                | 19.5-41.0                                  | 21.4-33.8                                 |
|                                   |             | M**                  | 30.05                                    | 28.17                                      | 25.68                                     |
|                                   |             | D. S***              | 8.92                                     | 7.07                                       | 3.69                                      |

R\*= Rango; M\*\*= Media; D.S\*\*\*= Desviación estándar; n=9= Número de Muestras por Ventana

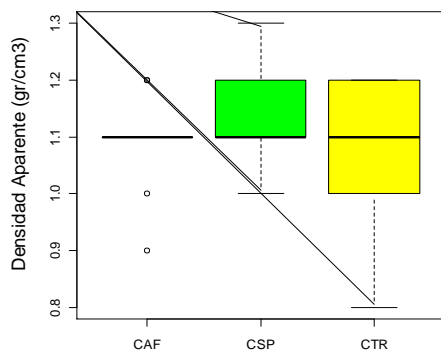


Figura 31 (a) Ventanas Paisajísticas

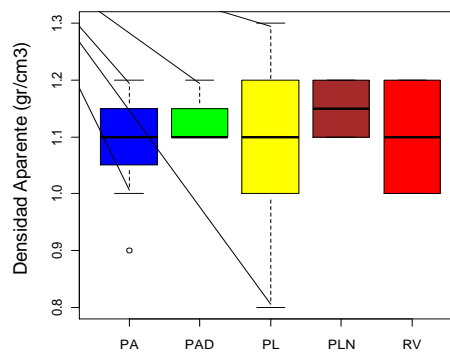


Figura 31 (b) Usos del Suelo

**Figura 31. Cambios de la densidad aparente en ventanas paisajísticas y usos del suelo.**

Figura 31 (a). La ventana agroforestal (CAF) tuvo la menor variabilidad en los datos de densidad aparente, cerca del 100% de los datos tuvieron una densidad aparente inferior a  $1.1 \text{ g/cm}^3$ , con valores extremos bajos de  $0.9 \text{ g/cm}^3$  y valores extremos altos de  $1.2 \text{ g/cm}^3$ , contrario a esto, el sistema tradicional (CTR) tuvo datos más dispersos y el 75% de los datos tuvieron un valor inferior a  $1.2 \text{ g/cm}^3$ . Figura 31 (b) El uso agroforestal (PA) presentó la menor variabilidad en los datos de densidad aparente, oscilando entre  $0.9$  y  $1.2 \text{ g/cm}^3$ . El 75% de los datos tuvieron una densidad aparente menor de  $1.2 \text{ g/cm}^3$ , mientras que el uso pasto limpio (PL) tuvo los datos más dispersos, presentando valores altos de  $1.3 \text{ g/cm}^3$  y valores mínimos alrededor de  $0.8 \text{ g/cm}^3$ .

**▪ 4.2.2.2. Resistencia Tangencial al Corte**

La resistencia tangencial al corte mostró los valores más altos en el sistema silvopastoril hasta  $95.0 \text{ kPa}$ , mientras los más bajos se presentaron en el sistema agroforestal con  $34.5 \text{ kPa}$  (**Tabla 4**). La figura 32 ilustra las gráficas de Box Plot, donde se detalla el comportamiento de la resistencia tangencial al corte del suelo en las ventanas paisajísticas (Sistemas) y los diferentes usos.

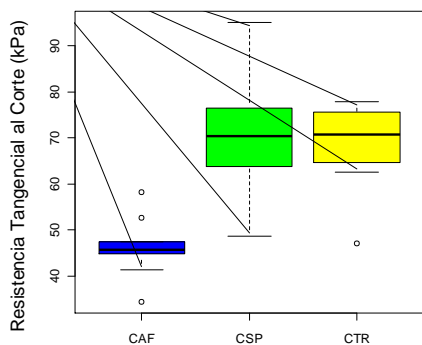


Figura 32 (a) Ventanas Paisajísticas

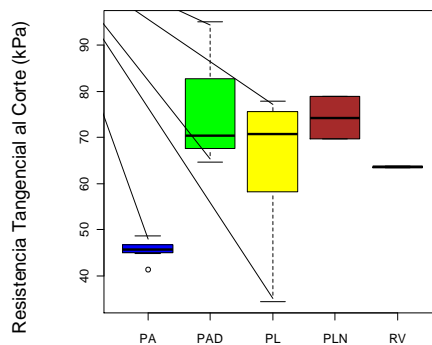


Figura 32 (b) Usos del Suelo

### Figura 32. Cambios en la resistencia tangencial al corte en ventanas paisajísticas y usos del suelo.

Figura 32 (a). La ventana agroforestal (CAF) tuvo la menor variabilidad en los datos de resistencia tangencial al corte, cerca del 100% de los datos tuvieron una resistencia tangencial al corte inferior a 50 kPa, con valores extremos bajos de 34.5 kPa y valores extremos altos de 58.3 kPa, contrario a esto, el sistema silvopastoril (CSP) tuvo datos más dispersos y el 75% de los datos tuvieron un valor inferior a 80 kPa. Figura 32 (b) El uso agroforestal (PA) presentó la menor variabilidad en los datos de resistencia tangencial al corte, con valores entre 41.4 y 48.7 kPa, mientras que el uso pasto limpio (PL) tuvo los datos más dispersos, con valores entre 34.5 y 77.9 kPa, respectivamente. El uso pasto con árboles dispersos (PAD) presentó los valores más altos en resistencia tangencial al corte con 95 kPa, lo cual es atribuible a la influencia de las raíces de los árboles en las determinaciones de campo.

#### ▪ 4.2.2.3. Resistencia Vertical a la Penetración

La resistencia vertical a la penetración mostró los valores más altos en el sistema tradicional con 44.8 Kgf/cm<sup>2</sup>, mientras los valores más bajos se mostraron en el sistema silvopastoril con 19.5 Kgf/cm<sup>2</sup> (**Tabla 4**). La figura 33 ilustra las gráficas de Box Plot, donde se detalla el comportamiento de la RTc del suelo en cuanto a las ventanas paisajísticas (Sistemas) y los diferentes usos del suelo.

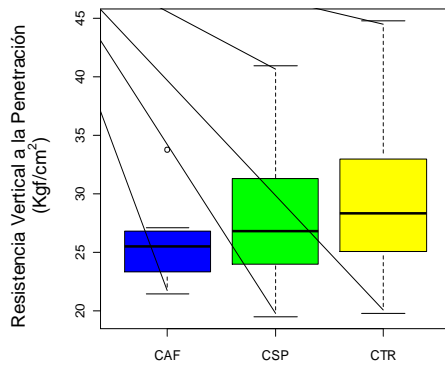


Figura 33 (a) Ventanas Paisajísticas

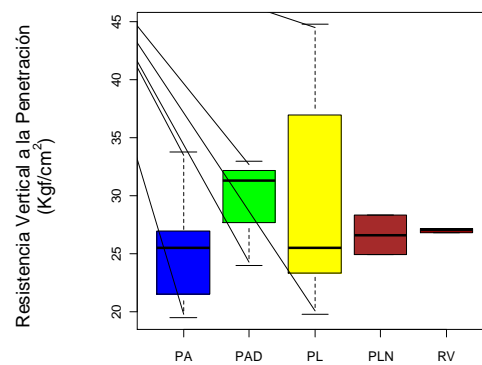


Figura 33 (b) Usos del Suelo

### Figura 33. Cambios en la resistencia tangencial al corte en ventanas paisajísticas y usos del suelo.

Figura 33 (a). La ventana agroforestal (CAF) tuvo la menor variabilidad en los datos de resistencia vertical a la penetración, cerca del 100% de los datos tuvieron una resistencia vertical a la penetración inferior a  $28 \text{ Kgf/cm}^2$ , con valores extremos altos de  $33.8 \text{ Kgf/cm}^2$ , contrario a esto, el sistema tradicional (CTR) tuvo datos más dispersos donde el 75% tuvo un valor inferior a  $35 \text{ Kgf/cm}^2$ . Figura 33 (b) El uso barbecho viejo (RV) presentó la menor variabilidad en los datos de resistencia vertical a la penetración, con valores entre  $26.8$  y  $27.2 \text{ Kgf/cm}^2$ , mientras que el uso pasto limpio (PL) tuvo los datos más dispersos, con valores entre  $19.8$  y  $44.8 \text{ Kgf/cm}^2$ , respectivamente.

## 4.2.3. Análisis de las Propiedades Físicas Volumétricas

### 4.2.3.1. Porosidad Total

El análisis de la porosidad total mostró que los valores más altos se presentaron en el sistema tradicional con  $69.5\%$  al igual que los valores más bajos con  $52\%$  (Tabla 5). La figura 34 ilustra las gráficas de Box Plot, donde se detalla el comportamiento de la porosidad total del suelo en cuanto a las ventanas paisajísticas (sistemas) y los diferentes usos del suelo.

**Tabla 5. Propiedades Físicas (Volumétricas) del suelo: Porosidad Total (%), Humedad (%) y D. Real (gr/cm<sup>3</sup>).**

| VARIABLE                      | PROFUNDIDAD | R*<br>M**<br>D. S*** | SISTEMA TRADICIONAL<br>n <sup>1</sup> =9 | SISTEMA SILVOPASTORIL<br>n <sup>2</sup> =9 | SISTEMA AGROFORESTAL<br>n <sup>3</sup> =9 |
|-------------------------------|-------------|----------------------|--|--|---|
| POROSIDAD TOTAL (%)           | 0-10        | R*                   | 52.0-69.5                                | 52.2-63.6                                  | 55.0-64.3                                 |
|                               |             | M**                  | 58.64                                    | 49.98                                      | 58.35                                     |
|                               |             | D. S***              | 5.58                                     | 3.82                                       | 3.15                                      |
| HUMEDAD (%)                   | 0-10        | R*                   | 23.0-40.0                                | 21.0-39.6                                  | 27.0-41.5                                 |
|                               |             | M**                  | 28.94                                    | 28.22                                      | 28.54                                     |
|                               |             | D. S***              | 4.9                                      | 5.47                                       | 5.11                                      |
| D. REAL (gr/cm <sup>3</sup> ) | 0-10        | R*                   | 2.5-2.7                                  | 2.5-2.7                                    | 2.5-2.7                                   |
|                               |             | M**                  | 2.57                                     | 2.61                                       | 2.59                                      |
|                               |             | D. S***              | 0.05                                     | 0.06                                       | 0.06                                      |

R\*= Rango; M\*\*= Media; D.S\*\*\*= Desviación estándar; n= Número de fincas

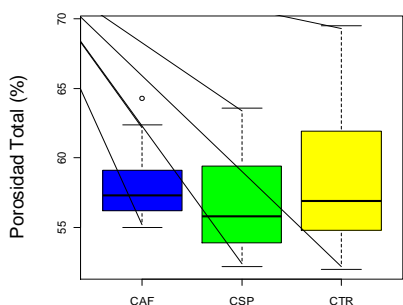


Figura 34 (a) Ventanas Paisajísticas

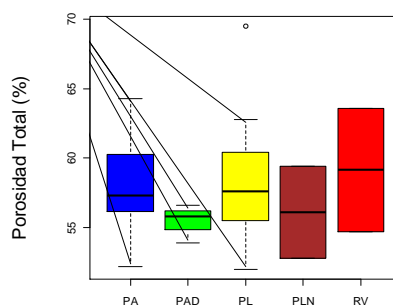


Figura 34 (a) Usos del Suelo

### Figura 34. Cambios en la porosidad total en ventanas paisajísticas y usos del suelo.

Figura 34 (a). La ventana agroforestal (CAF) tuvo la menor variabilidad en los datos de porosidad total, el 75% de los datos tuvieron una porosidad total inferior a 60%, con valores extremos altos de 64.3%, contrario a esto, el sistema tradicional (CTR) tuvo datos más dispersos donde el 75% tuvo un valor inferior a 65%. Figura 34 (b) El uso agroforestal (PA) presentó la mayor variabilidad en los datos de porosidad total, con valores entre 52.2 y 64.3%, mientras que el uso pasto con árboles dispersos (PAD) tuvo los datos menos dispersos, con valores entre 53.9 y 56.6%, respectivamente.

#### ▪ 4.2.3.2. Humedad

El análisis de la humedad mostró que los valores más altos se presentaron en el sistema agroforestal hasta con 41.5%, mientras los valores más bajos se presentaron en el sistema silvopastoril con 21% (**Tabla 5**). La figura 35 ilustra las gráficas de Box Plot, donde se detalla el comportamiento de la humedad del suelo en cuanto a las ventanas paisajísticas (sistemas) y los diferentes usos del suelo.

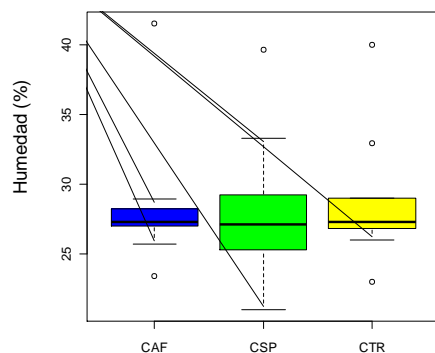


Figura 35 (a) Ventanas Paisajísticas

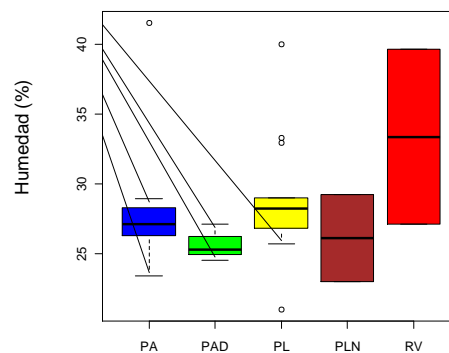


Figura 35 (b) Usos del Suelo

**Figura 35. Cambios en la humedad en ventanas paisajísticas y usos del suelo.**

Figura 35 (a). La ventana agroforestal (CAF) tuvo la menor variabilidad en los datos de humedad, el 75% de los datos tuvieron una humedad inferior a 30%, con valores extremos altos de 41.5% y valores extremos bajos de 23.4%, contrario a esto, el sistema silvopastoril (CSP) tuvo datos más dispersos donde el 75% tuvo un valor inferior a 30%, presentando valores extremos máximos de 39.6% y valores extremos mínimos de 21%. Figura 35 (b) El uso pasto con árboles dispersos (PAD) presentó la menor variabilidad en los datos de humedad, con valores entre 24.5 a 25.3%, mientras que el uso barbecho viejo (RV) tuvo los datos más dispersos, con valores entre 27.1 y 39.6%, respectivamente.

#### 4.2.3.3. Densidad Real

El análisis de la densidad real no presenta diferencias significativas entre los sistemas de uso del suelo, mostrando valores medios entre 2.57 y 2.61% (Tabla 5). La figura 36 ilustra las gráficas de Box Plot, donde se detalla el comportamiento de la Densidad Real del suelo en cuanto a las profundidades, ventanas paisajísticas (Sistemas) y los diferentes usos del suelo.

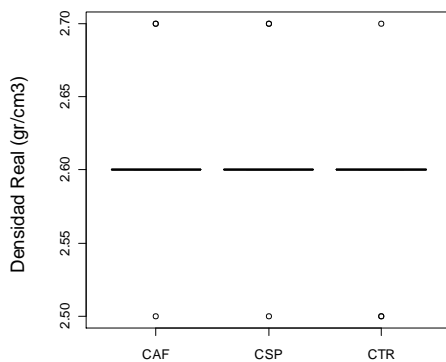


Figura 36 (a) Ventanas Paisajísticas

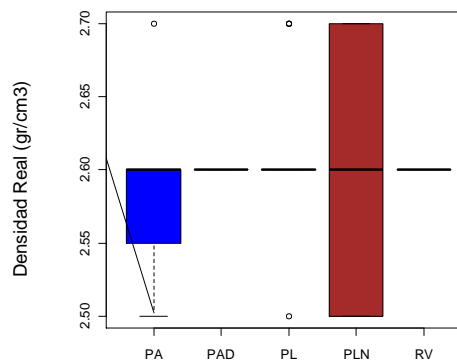


Figura 36 (b) Usos del Suelo

**Figura 36. Cambios en la densidad real en ventanas paisajísticas y usos del suelo.**

Figura 36 (a). No muestra diferencias entre los valores obtenidos para densidad real en los diferentes sistemas de uso del suelo, los valores mínimos para densidad real fueron de 2.5 gr/cm<sup>3</sup>, mientras los valores más altos fueron de 2.7 gr/cm<sup>3</sup>. Figura 36 (b) El uso pasto con leñosas (PLN) presentó la mayor variabilidad en los datos de densidad real, con valores entre 2.54 a 2.71%, mientras que el uso agroforestal (PA) tuvo los datos menos dispersos, con valores entre 2.48 y 2.66 gr/cm<sup>3</sup>, respectivamente.

#### 4.2.4. Análisis de las Propiedades Físicas Estructurales

- 4.2.4.1. Textura

- 4.2.4.1.1. Arena

El análisis textural determinó para el contenido de arena que los valores más altos se presentaron en el sistema agroforestal con 52.8%, mientras que los valores más bajos se presentaron en el sistema tradicional con 5.9% (**Tabla 6**). La figura 37 ilustra las gráficas de Box Plot, donde se detalla el comportamiento del contenido de Arena del suelo en cuanto a las ventanas paisajísticas (Sistemas) y los diferentes usos.

**Tabla 6. Propiedades Físicas (Estructurales) del suelo: Textura (%A-L-Ar), Estabilidad de Agregados (mm) y Diámetro Medio Ponderado (%).**

| VARIABLE                      | PARÁMETRO              | R*<br>M**<br>D. S*** | SISTEMA TRADICIONAL | SISTEMA SILVOPASTORIL | SISTEMA AGROFORESTAL |          |
|-------------------------------|------------------------|----------------------|---------------------|-----------------------|----------------------|----------|
|                               |                        |                      | n <sup>1</sup> =9   | n <sup>2</sup> =9     | n <sup>3</sup> =9    |          |
| TEXTURA Profundidad (0-10 cm) | % A                    | R*                   | 5.9-45.4            | 3.6-18.6              | 24.6-52.8            |          |
|                               |                        | M**                  | 20.05               | 11.68                 | 35.87                |          |
|                               |                        | D. S***              | 13.87               | 5.38                  | 11.26                |          |
|                               | %L                     | R*                   | 20.1-46.9           | 35.4-58.0             | 15.3-39.5            |          |
|                               |                        | M**                  | 34.51               | 44.79                 | 25.75                |          |
|                               |                        | D. S***              | 9.49                | 6.68                  | 8.77                 |          |
|                               | % Ar                   | R*                   | 34.4-63.3           | 38.4-48.0             | 14.3-51.8            |          |
|                               |                        | M**                  | 45.44               | 43.53                 | 38.38                |          |
|                               |                        | D. S***              | 8.47                | 3.61                  | 11.83                |          |
|                               | E. AGREGADOS (0-10 cm) | 0.125-1 mm           | R*                  | 0.4-14.1              | 1.5-21.1             | 1.4-25.7 |
|                               |                        |                      | M**                 | 6.33                  | 18.52                | 10.50    |
|                               |                        |                      | D. S***             | 4.99                  | 6.30                 | 8.64     |
| 1-2 mm                        |                        | R*                   | 0.6-22.3            | 0.5-13.8              | 2.2-20.9             |          |
|                               |                        | M**                  | 8.81                | 8.58                  | 7.97                 |          |
|                               |                        | D. S***              | 6.99                | 4.39                  | 5.91                 |          |
| 2-4 mm                        |                        | R*                   | 0.7-25.9            | 0.4-15.4              | 3.1-16.0             |          |
|                               |                        | M**                  | 11.65               | 9.01                  | 7.70                 |          |
|                               |                        | D. S***              | 8.49                | 4.70                  | 3.90                 |          |
| 4-6 mm                        |                        | R*                   | 0.6-22.3            | 0.5-13.8              | 2.2-20.9             |          |
|                               |                        | M**                  | 8.81                | 8.58                  | 7.97                 |          |
|                               |                        | D. S***              | 6.99                | 4.39                  | 5.91                 |          |
| >6 mm                         | R*                     | 0.4-14.1             | 1.5-21.1            | 1.4-25.7              |                      |          |
|                               | M**                    | 6.33                 | 18.52               | 10.50                 |                      |          |
|                               | D. S***                | 4.99                 | 6.30                | 8.64                  |                      |          |
| DMP (0-10 cm) (%)             | R*                     | 3.1-6.6              | 2.8-6.7             | 2.4-6.5               |                      |          |
|                               | M**                    | 5.12                 | 4.99                | 4.79                  |                      |          |
|                               | D. S***                | 1.19                 | 1.15                | 1.59                  |                      |          |

R\*= Rango; M\*\*= Media; D.S\*\*\*= Desviación estándar; n=Número de fincas

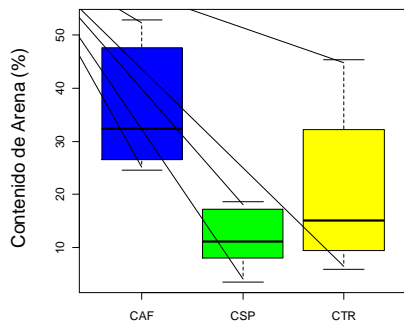


Figura 37 (a) Ventanas Paisajísticas

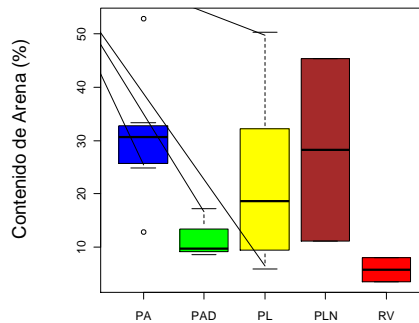


Figura 37 (b) Usos del Suelo

**Figura 37. Cambios en contenido de arena en ventanas paisajísticas y usos del suelo.**

Figura 37 (a). La ventana tradicional (CTR) tuvo la mayor variabilidad en los datos de contenido de arena, el 75% de los datos tuvieron un contenido de arena inferior a 40%, por su parte, el sistema agroforestal presentó el mayor valor en contenido de arena de todos los sistemas evaluados con 50.3%, mientras el menor valor se presentó en el sistema silvopastoril con 3.6%. Contrario a esto, el sistema silvopastoril (CSP) tuvo datos menos dispersos donde el 75% tuvo un valor inferior a 20% y cuyos datos reportaron valores entre 3.6 y 18.6%. Figura 37 (b) El uso barbecho viejo (RV) presentó la menor variabilidad en los datos de contenido de arena, con valores entre 3.6 y 8.1%, mientras que el uso pasto con leñosas (PLN) tuvo los datos más dispersos, con valores entre 11.2 y 45.4%, respectivamente.

#### 4.2.4.1.2. Limo

El contenido de limo presentó los valores más altos en el sistema silvopastoril con 58%, mientras que los valores más bajos se presentaron en el sistema agroforestal con 15.3% (**Tabla 6**). La figura 38 ilustra las gráficas de Box Plot, donde se detalla el comportamiento del contenido de Limo del suelo en cuanto a las ventanas paisajísticas (sistemas) y los diferentes usos.

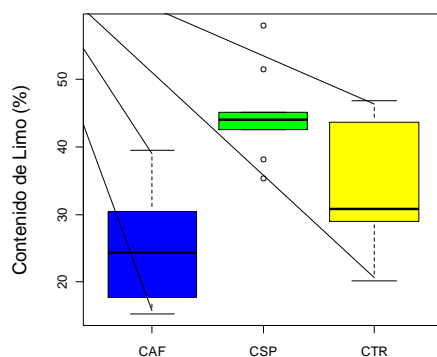


Figura 38 (a) Ventanas Paisajísticas

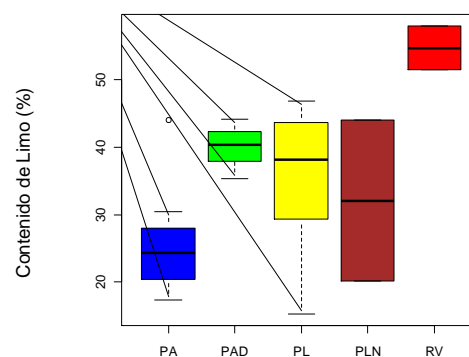


Figura 38 (b) Usos del Suelo

**Figura 38. Cambios en el contenido de limo en ventanas paisajísticas y usos del suelo.**

Figura 38 (a). La ventana silvopastoril (CSP) tuvo la menor variabilidad en los datos de contenido de limo, el 75% de los datos tuvieron un contenido de limo inferior a 50%, presentando valores extremos máximos de 58% y mínimos de 35.4%. Por su parte, el sistema tradicional presentó la mayor variabilidad en los datos, con valores entre 20.1 y 46.9%. Figura 38 (b) El uso pasto limpio (PL) presentó la mayor variabilidad en los datos de contenido de limo, con valores entre 15.3 y 46.9%, mientras que el uso pasto con árboles dispersos (PAD) tuvo los datos menos dispersos, con valores entre 35.4 y 44.2%, respectivamente.

#### 4.2.4.1.3. Arcilla

El análisis del contenido de arcilla presentó los valores más altos en el sistema silvopastoril hasta 58%, mientras los valores más bajos se presentaron en el sistema agroforestal con 15.3% (**Tabla 6**). La figura 38 ilustra las gráficas de Box Plot, donde se detalla el comportamiento del contenido de Limo del suelo en cuanto a las ventanas paisajísticas (Sistemas) y los diferentes usos.

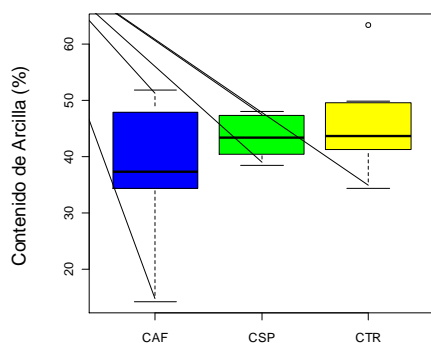


Figura 39 (a) Ventanas Paisajísticas

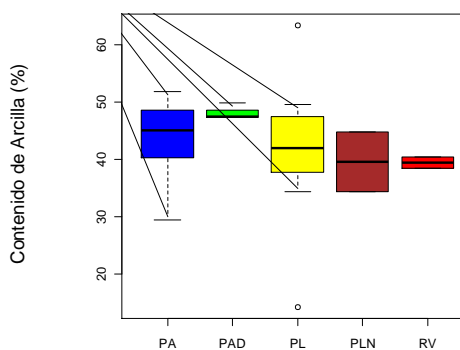


Figura 39 (b) Usos del Suelo

#### Figura 39. Cambios en el contenido de arcilla en ventanas paisajísticas y usos del suelo.

Figura 39 (a). La ventana agroforestal (CAF) tuvo la mayor variabilidad en los datos de contenido de arcilla, el 75% de los datos tuvieron un contenido de arcilla

inferior a 50%, presentando el valor más alto con 51.8% y el valor más bajo con 14.3%. Por su parte, el sistema silvopastoril (CSP) presentó la menor variabilidad en los datos, con valores entre 39.3 y 48%. Figura 39 (b) El uso barbecho viejo (RV) presentó la menor variabilidad en los datos de contenido de arcilla, con valores entre 38.4 y 40.4%, mientras que el uso agroforestal (PA) tuvo los datos más dispersos, con valores entre 29.4 y 51.8%, respectivamente. Por su parte el uso pasto limpio (PL) presentó el valor extremo más alto con 63.3%.

#### 4.2.4.2. Estabilidad de Agregados 0.125-1 mm

Los agregados estables entre 0.125 y 1 mm presentaron los valores más altos en el sistema agroforestal con 25.7%, mientras que los valores más bajos se presentaron en el sistema tradicional con 0.4% (**Tabla 6**). La figura 40 ilustra las gráficas de Box Plot, donde se detalla el comportamiento de los agregados estables al agua en el tamiz 0.125 a 1 mm, en cuanto a las ventanas paisajísticas (sistemas) y los diferentes usos del suelo.

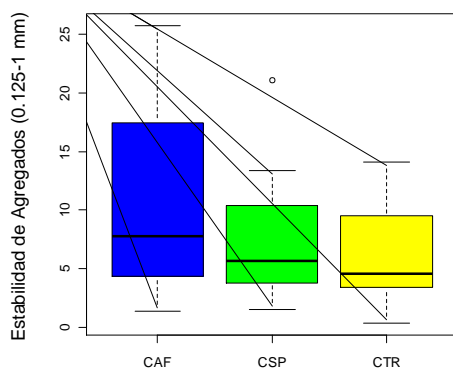


Figura 40 (a) Ventanas Paisajísticas

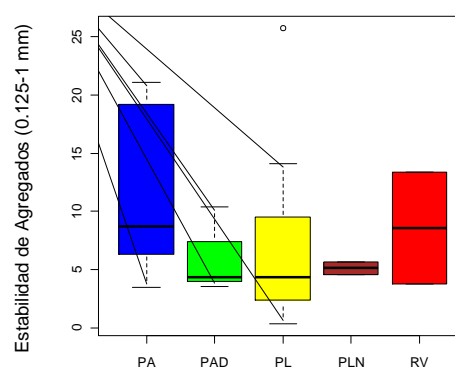


Figura 40 (b) Usos del Suelo

**Figura 40. Cambios en los agregados estables (0.125-1 mm) en ventanas paisajísticas y usos del suelo.**

Figura 40 (a). La ventana agroforestal (CAF) tuvo la mayor variabilidad en los datos de agregados estables de 0.125 a 1 mm, el 75% de los datos tuvieron agregados estables (0.125-1 mm) inferiores a 20%, presentando el valor más alto con 25.7%, mientras el valor más bajo se presentó en el sistema tradicional (CTR) con 0.4%. Por su parte, el sistema silvopastoril (CSP) presentó la menor variabilidad en los datos, con valores entre 1.5 y 21.1%. Figura 40 (b) El uso pasto con leñosas (PLN) presentó la menor variabilidad en los datos de agregados estables 0.125 – 1 mm, con valores entre 4.6 a 5.7%, mientras que el uso agroforestal (PA) tuvo los datos más dispersos, con valores entre 3.5 y 21.1%, respectivamente. Por su parte el uso pasto limpio (PL) presentó el valor extremo más alto con 25.7%.

#### 4.2.4.3. Estabilidad de Agregados 1 - 2 mm

Los agregados estables entre 1-2 mm presentaron los valores más altos en el sistema tradicional con 22.3%, mientras que los valores más bajos se presentaron en los sistema silvopastoril con 0.5% (**Tabla 6**). La figura 41 ilustra las gráficas de Box Plot, donde se detalla el comportamiento de los agregados estables al agua en el tamiz 1 - 2 mm, en cuanto a las ventanas paisajísticas (Sistemas) y los diferentes usos del suelo.

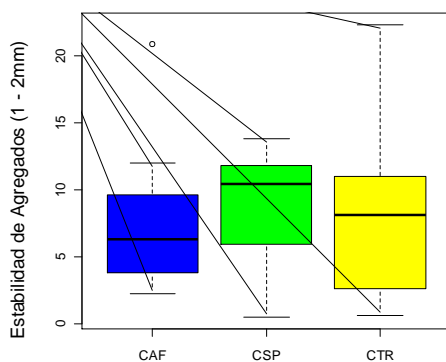


Figura 41 (a) Ventanas Paisajísticas

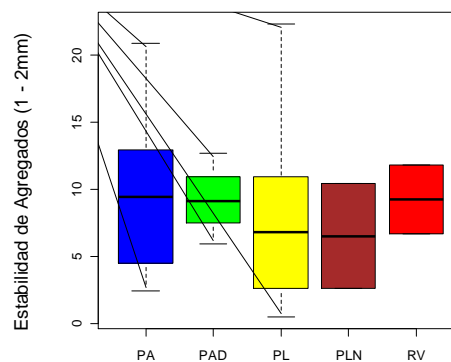


Figura 41 (b) Usos del Suelo

**Figura 41. Cambios en los agregados estables (1 - 2 mm) en ventanas paisajísticas y usos del suelo.**

Figura 41 (a). La ventana tradicional (CTR) tuvo la mayor variabilidad en los datos de agregados estables de 1 - 2 mm, el 75% de los datos tuvieron agregados estables (1 - 2 mm) inferiores a 12%, presentando el valor más alto con 22.3%, mientras el valor más bajo se presentó en el sistema silvopastoril (CSP) con 0.5%. Por su parte, el sistema agroforestal (CAF) presentó la menor variabilidad en los datos, con valores entre 2.2 y 9.6%. Figura 41 (b) El uso pasto limpio (PL) presentó la mayor variabilidad en los datos de agregados estables 1 - 2 mm, con valores entre 0.5 a 22.3%, mientras que el uso pasto con árboles dispersos (PAD) tuvo los datos menos dispersos, oscilando entre 5.9 y 12.7%, respectivamente.

#### ▪ 4.2.4.4. Estabilidad de Agregados 2 - 4 mm

Los agregados estables de 2-4 mm presentaron los valores más altos en el sistema tradicional con 25.9%, de igual forma, los valores más bajos se presentaron en el sistema tradicional con 0.7% (**Tabla 6**). La figura 42 ilustra las gráficas de Box Plot, donde se detalla el comportamiento de los agregados estables al agua en el tamiz 2 - 4 mm, en cuanto a las ventanas paisajísticas (Sistemas) y los diferentes usos del suelo.

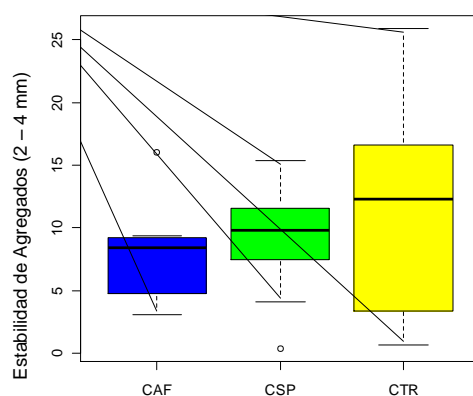


Figura 42 (a) Ventanas Paisajísticas

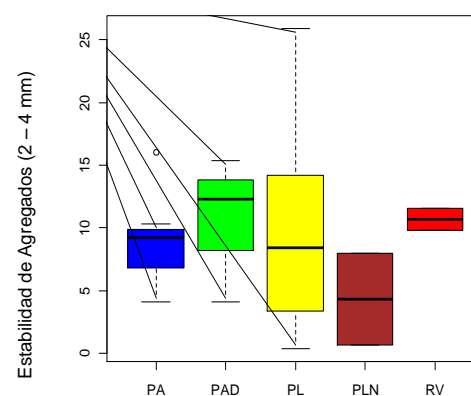


Figura 42 (b) Usos del Suelo

**Figura 42. Cambios en los agregados estables (2 - 4 mm) en ventanas paisajísticas y usos del suelo.**

Figura 42 (a). La ventana tradicional (CTR) tuvo la mayor variabilidad en los datos de agregados estables de 2 - 4 mm, el 75% de los datos tuvieron agregados estables (2 - 4 mm) inferiores a 17%, presentando el valor más alto con 25.9%, así mismo, el valor más bajo se presentó en el sistema tradicional (CTR) con 0.7%. Por su parte, el sistema agroforestal (CAF) presentó la menor variabilidad en los datos, con valores entre 3.1 y 9.4%, pero presentado un valor extremo máximo de 16%. Figura 42 (b) El uso barbecho viejo (RV) presentó la menor variabilidad en los datos de agregados estables 2 - 4 mm, con valores entre 9.8 a 11.6%, mientras que el uso pasto limpio (PL) tuvo los datos más dispersos, oscilando entre 0.4 y 25.9%, respectivamente.

#### 4.2.4.5. Estabilidad de Agregados 4 - 6 mm

Los agregados estables de 4-6 mm presentó los valores más altos para el sistema tradicional (CTR) con 22.3%, mientras los valores más bajos se presentaron en el sistema silvopastoril (CSP) con 0.5% (**Tabla 6**). La figura 43 ilustra las gráficas de Box Plot, donde se detalla el comportamiento de los agregados estables al agua en el tamiz 4 - 6 mm, en cuanto a las ventanas paisajísticas (Sistemas) y los diferentes usos del suelo.

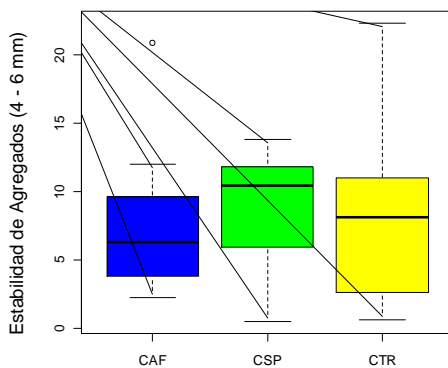


Figura 43 (a) Ventanas Paisajísticas

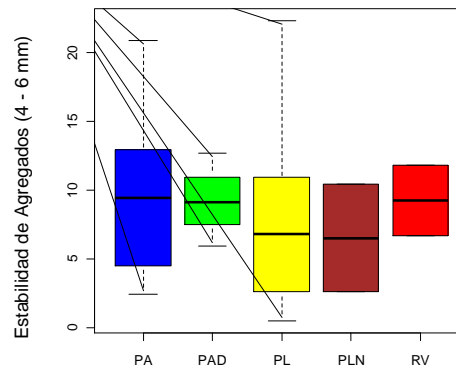


Figura 43 (b) Usos del Suelo

**Figura 43. Cambios en los agregados estables (4 - 6 mm) en ventanas paisajísticas y usos del suelo.**

Figura 43 (a). La ventana tradicional (CTR) tuvo la mayor variabilidad en los datos de agregados estables de 4 - 6 mm, el 75% de los datos tuvieron agregados estables (4 - 6 mm) inferiores a 12%, presentando el valor más alto con 22.3%, mientras el valor más bajo se presentó en el sistema silvopastoril (CSP) con 0.5%. Por su parte, el sistema agroforestal (CAF) presentó la menor variabilidad en los datos, con valores entre 2.2 y 9.6%, pero presentado un valor extremo máximo de 20.9%. Figura 43 (b) El uso pasto con árboles dispersos (PAD) presentó la menor variabilidad en los datos de agregados estables 4 - 6 mm, con valores entre 5.9 a 12.7%, mientras que el uso pasto limpio (PL) tuvo los datos más dispersos, oscilando entre 0.5 y 22.3%, respectivamente.

#### ▪ 4.2.4.6. Estabilidad de Agregados > 6 mm

Los agregados estables mayores de 6 mm presentó los valores más altos en el sistema agroforestal (CAF) con 25.7%, mientras los valores más bajos se presentaron en el sistema tradicional (CTR) con 0.4% (**Tabla 6**). La figura 44 ilustra las gráficas de Box Plot, donde se detalla el comportamiento de los agregados estables al agua en el tamiz >6 mm, en cuanto a las ventanas paisajísticas (Sistemas) y los diferentes usos del suelo.

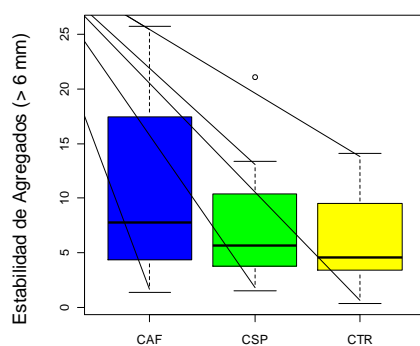


Figura 44 (a) Ventanas Paisajísticas

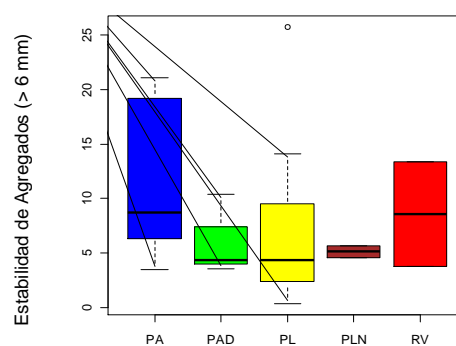


Figura 44 (b) Usos del Suelo

**Figura 44. Cambios en los agregados estables (6 mm) en ventanas paisajísticas y usos del suelo.**

Figura 44 (a). La ventana agroforestal (CAF) tuvo la mayor variabilidad en los datos de agregados estables de  $> 6$  mm, el 75% de los datos tuvieron agregados estables ( $> 6$  mm) inferiores a 20%, presentando el valor más alto con 25.7%, mientras el valor más bajo se presentó en el sistema tradicional (CTR) con 0.4%. Por su parte, el sistema silvopastoril (CSP) presentó la menor variabilidad en los datos, oscilando entre 1.5 y 13.4%, pero presentado un valor extremo máximo de 21.1%. Figura 44 (b) El uso pasto con leñosas (PLN) presentó la menor variabilidad en los datos de agregados estables  $> 6$  mm, con valores entre 4.6 a 5.7%, mientras que el uso agroforestal (PA) tuvo los datos más dispersos, oscilando entre 3.5 y 21.1%, respectivamente.

#### ▪ 4.2.4.6. Diámetro Medio Ponderado

El diámetro medio ponderado presentó los valores más altos en el sistema silvopastoril (CSP) con 6.7%, mientras los valores más bajos se presentaron en el sistema agroforestal (CAF) con 2.4% (**Tabla 6**). La figura 45 ilustra las gráficas de Box Plot, donde se detalla el comportamiento del diámetro medio ponderado, en cuanto a las ventanas paisajísticas (Sistemas) y los diferentes usos del suelo.

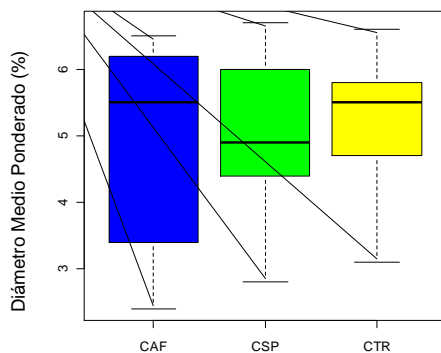


Figura 45 (a) Ventanas Paisajísticas

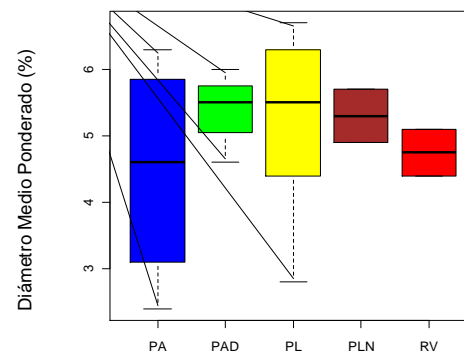


Figura 45 (a) Usos del Suelo

**Figura 45. Cambios en el diámetro medio ponderado en ventanas paisajísticas y usos del suelo.**

Figura 45 (a). La ventana agroforestal (CAF) tuvo la mayor variabilidad en los datos de diámetro medio ponderado, el 75% de los datos tuvieron diámetro medio ponderado inferior a 6%, mientras el valor más alto fue de 6.5%, de la misma manera, el valor más bajo se presentó en el sistema agroforestal (CAF) con 2.4%. Por su parte, el sistema tradicional (CTR) presentó la menor variabilidad en los datos, con valores entre 3.1 y 6.6%. Figura 45 (b) El uso barbecho viejo (RV) presentó la menor variabilidad en los datos de diámetro medio ponderado, oscilando entre 4.4 a 6.0%, mientras que el uso agroforestal (PA) tuvo los datos más dispersos, oscilando entre 2.4 y 6.2%, respectivamente.

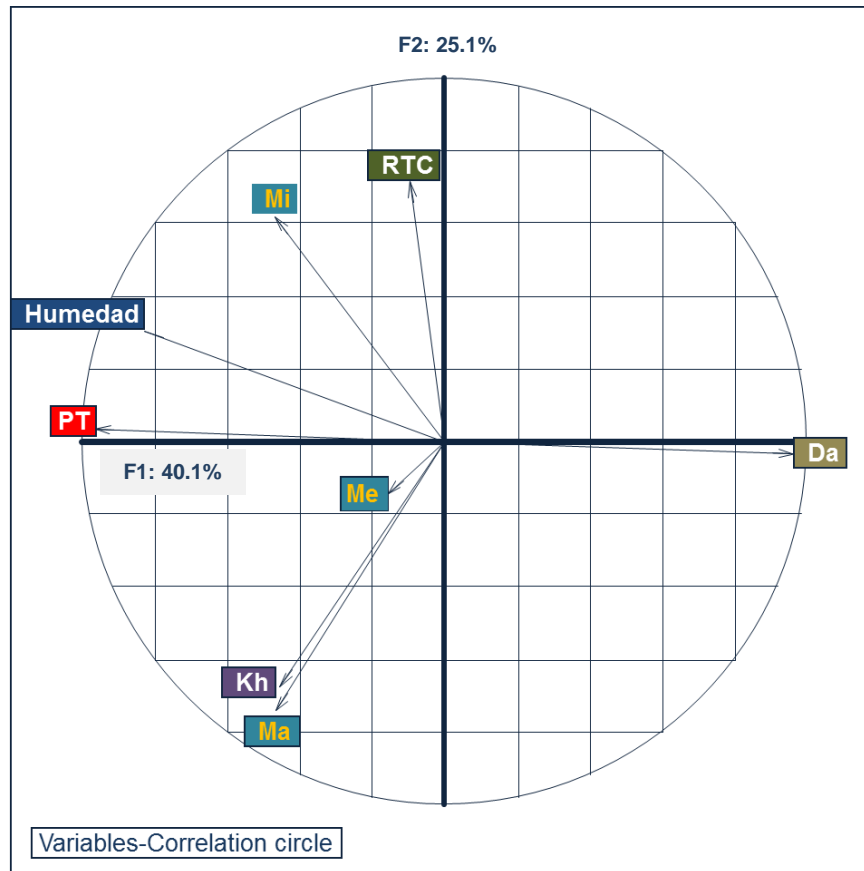
### 4.3. Análisis de la Etapa 2-A

En esta etapa se evaluaron 27 puntos a 3 profundidades (0-10, 10-15 y 20-40 cm) y siete (7) variables:

- **Mecánico** (Densidad aparente (Da), resistencia tangencial al corte (RTC)).
- **Volumétrico** (Porosidad total (PT), humedad (H), Macroporosidad (Ma), Microporosidad (Mi), Conductividad Hidráulica (Kh)).

#### 4.3.1. Análisis de componentes principales ACP (Etapa 2-A: 27 puntos 0-10, 10-15 y 20-40 cm y 7 variables)

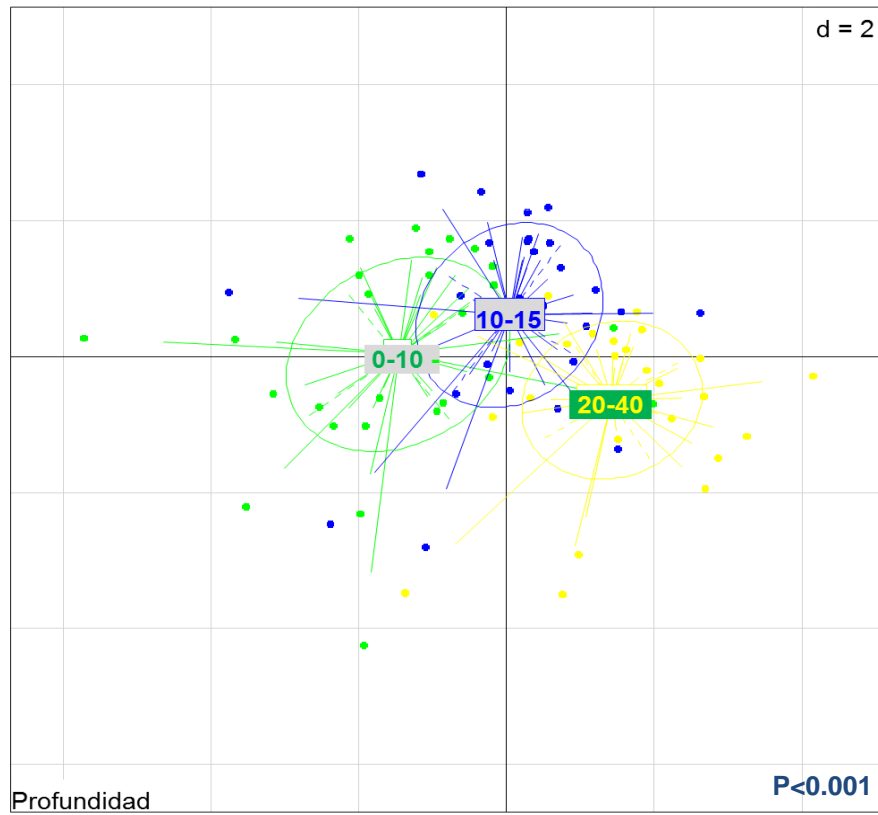
Los factores 1 y 2 del análisis de componentes principales explican el 65.2% de la variabilidad de los datos, El factor 1 explica el 40.1% de la variabilidad de los datos y separa los sistemas de uso del suelo en función de las variables: densidad aparente, porosidad y humedad. El Factor 2 explica el 25.1% y separa los usos en función de las variables: resistencia tangencial al corte, microporosidad, macroporosidad y conductividad hidráulica (Figura 46).



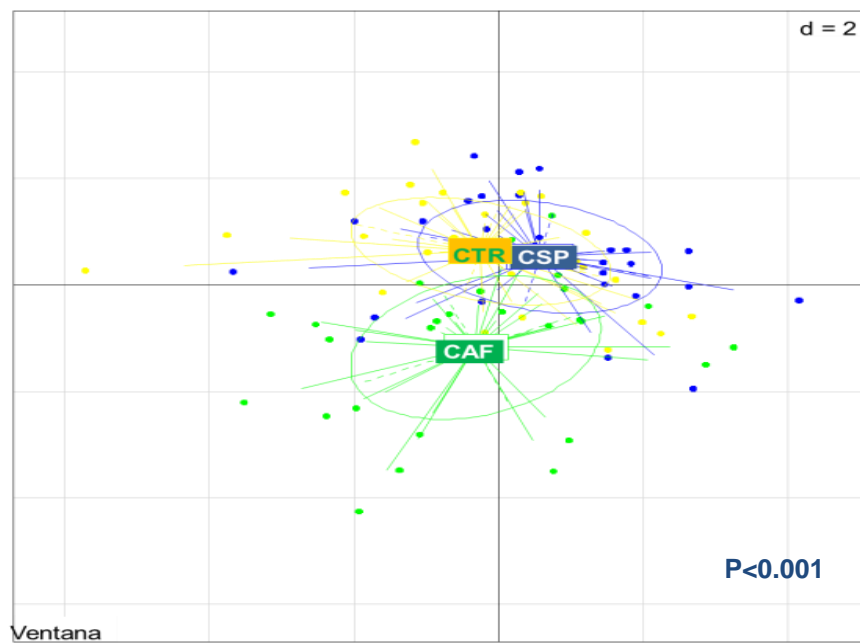
Da: densidad aparente, RTC: resistencia tangencial al corte, PT: porosidad total, humedad, Ma: macroporosidad, Me: mesoporosidad, Mi: microporosidad, Kh: conductividad hidráulica.

**Figura 46. Análisis de Componentes Principales ACP Correlación de Variables y valor de la explicación de los Factores 1 y 2.**

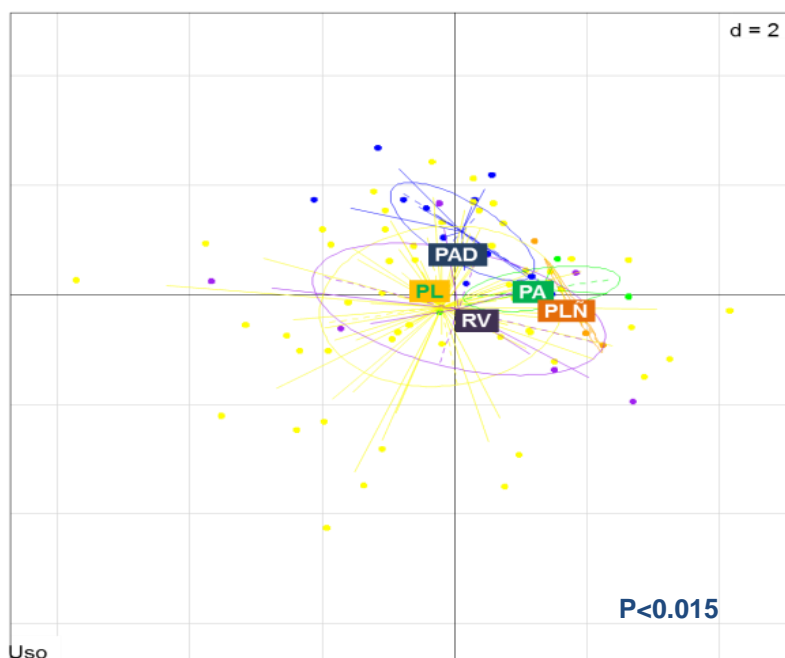
La figura 47 (a) ilustra cómo el análisis de componentes principales ACP separó en forma significativa ( $p < 0.001$ ) las profundidades 0-10, 10-15 y 20-40 cm. La Figura 47 (b) ilustra como el ACP separó en forma significativa ( $p < 0.001$ ) las ventanas paisajísticas Tradicional CTR, Silvopastoril CSP y Agroforestal CAF. En la figura 47 (c) se observa la separación significativa ( $p < 0.015$ ) de los diferentes usos del suelo en función de las variables Pasto Limpio PL, Pasto con Árboles Dispersos PAD, Pasto con Leñosas PLÑ, Barbecho Viejo RV y Sistema Agroforestal PA, en función de las variables físicas.



47 (a) Profundidades (0-10 cm, 10-15 cm y 20-40 cm)



## 47 (b) Ventanas (CAF: Agroforestal, CTR: Tradicional, CSP: Silvopastoril).



47(c) Usos del Suelo (PAD: Pasto con árboles dispersos, PL: Pasto limpio, RV: Barbecho viejo, PA: Agroforestal, PLN: Pasto con leñosas).

Figura 47. Análisis de componentes principales distribución por (a) profundidades, (b) ventanas paisajísticas (Sistemas) y (c) usos del suelo.

### 4.3.2. Análisis de las Propiedades Físicas Mecánicas

#### 4.3.2.1. Densidad Aparente

La densidad aparente de suelo presentó los valores más altos en los sistemas silvopastoril y agroforestal con  $1.45 \text{ gr/cm}^3$ , mientras los más bajos en el sistema tradicional con  $0.78 \text{ gr/cm}^3$  (Tabla 7). La figura 48 ilustra las gráficas de Box Plot, donde se detalla el comportamiento de la densidad aparente del suelo en cuanto a la profundidad (cm), las ventanas paisajísticas (sistemas) y los diferentes usos del suelo.

**Tabla 7. Propiedades Físicas (Mecánicas) del suelo: D. Aparente (gr/cm<sup>3</sup>) y RTC (kPa).**

| VARIABLE                                    | PROFUNDIDAD (cm) | R*<br>M**<br>D. S*** | SISTEMA TRADICIONAL<br>n <sup>1</sup> =9 | SISTEMA SILVOPASTORIL<br>n <sup>2</sup> =9 | SISTEMA AGROFORESTAL<br>n <sup>3</sup> =9 |
|---|------------------|----------------------|--|--|---|
| <b>D. APARENTE</b><br>(gr/cm <sup>3</sup> ) | 0-10 cm          | R*                   | 0,78-1,20                                | 0,96-1,26                                  | 0,96-1,31                                 |
|   |                  | M**                  | 1.06                                     | 1.13                                       | 1.13                                      |
|   |                  | D. S***              | 1.13                                     | 0.09                                       | 0.11                                      |
|   | 10-15 cm         | R*                   | 0,87-1,21                                | 1,10-1,32                                  | 1,08-1.45                                 |
|   |                  | M**                  | 1.09                                     | 1.19                                       | 1.24                                      |
|   |                  | D. S***              | 0.11                                     | 0.08                                       | 0.10                                      |
| 20-40 cm                                    | R*               | 0,96-1,31            | 1,08-1.45                                | 0,95-1,38                                  |   |
|   | M**              | 1.13                 | 1.24                                     | 1.17                                       |   |
|   | D. S***          | 0.11                 | 0.10                                     | 0.13                                       |   |
| <b>RTC</b><br>(kPa)                         | 0-10 cm          | R*                   | 47,09-77,92                              | 61,67-90,84                                | 26,59-50,67                               |
|   |                  | M*                   | 68.54                                    | 71.47                                      | 33.45                                     |
|   |                  | D. S*                | 9.65                                     | 10.27                                      | 7.6                                       |
|   | 10-15 cm         | R*                   | 63,42-95,01                              | 65,92-85,34                                | 34,34-42,84                               |
|   |                  | M*                   | 71.01                                    | 75.20                                      | 38.57                                     |
|   |                  | D. S*                | 12.64                                    | 7.24                                       | 3.06                                      |
| 20-40 cm                                    | R*               | 34,51-58,26          | 23,51-62,01                              | 11,01-33,84                                |   |
|   | M*               | 46.25                | 48.16                                    | 24.11                                      |   |
|   | D. S*            | 6.62                 | 6.93                                     | 6.64                                       |   |

R\*= Rango; M\*\*= Media; D.S\*\*\*= Desviación estándar; n=9= Número de Muestras por Ventana

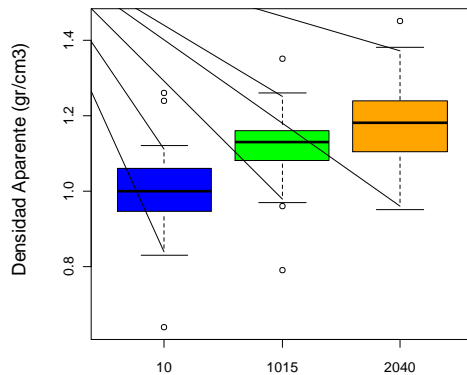


Figura 48 (a) Profundidad (cm)

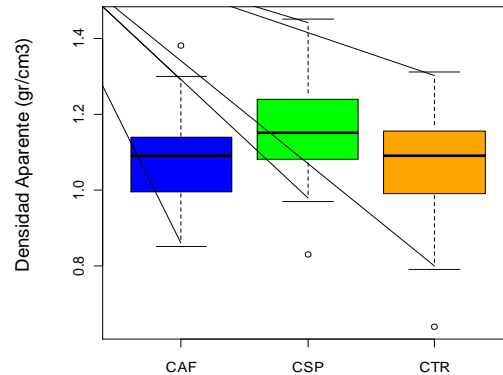


Figura 48 (b) Ventanas Paisajísticas

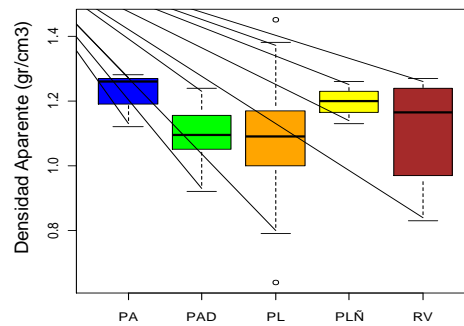


Figura 48 (c) Usos del Suelo

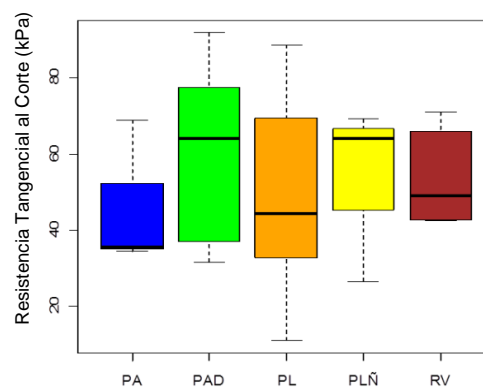
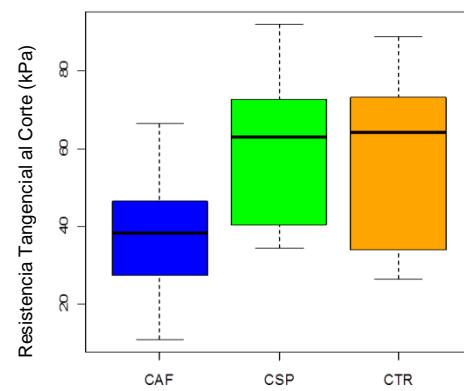
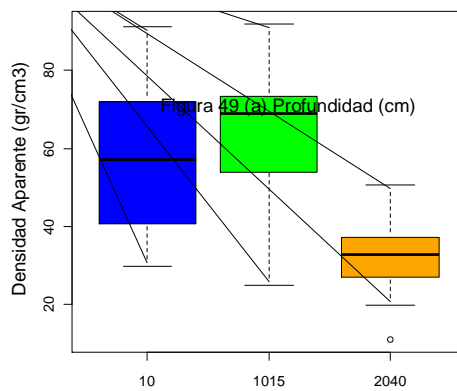
**Figura 48. Cambios en la densidad aparente en (a) profundidades, (b) ventanas paisajísticas (sistemas) y (c) usos del suelo.**

Figura 48 (a) en la profundidad de 10-15 cm se presentó la menor variabilidad en los datos de densidad aparente, el 75% de los datos tuvieron una densidad aparente menor a  $1.2 \text{ g/cm}^3$ , contrario a esto, la profundidad de 20-40 cm presentó presento datos de densidad aparente más dispersos, donde el 75% de los datos tuvieron un valor inferior a  $1.4 \text{ g/cm}^3$ . Figura 48 (b) La ventana agroforestal (CAF) tuvo la menor variabilidad en los datos de densidad aparente, el 75% de los datos tuvieron una densidad aparente inferior a  $1.31 \text{ g/cm}^3$ , contrario a esto, el sistema silvopastoril (CSP) tuvo datos más dispersos y el 75% de los datos tuvieron un valor inferior a  $1.26 \text{ g/cm}^3$ . Figura 48 (c) El uso pasto con leñosas (PLÑ) presentó la menor variabilidad en los datos de densidad aparente, el 75% de los datos tuvieron una densidad aparente menor de  $1.22 \text{ g/cm}^3$ ,

mientras que el uso pasto limpio (PL) tuvo los datos más dispersos y el 75% de los datos fue inferior a  $1.2 \text{ g/cm}^3$ , presentando valores extremos alrededor de  $1.45 \text{ g/cm}^3$ .

#### 4.3.2.2. Resistencia Tangencial al Corte

El análisis de la resistencia tangencial al corte presentó los valores más altos en el sistema tradicional con 95.01 kPa, mientras los valores más bajos en los sistema agroforestal con 11.01 kPa (**Tabla 7**). La Figura 49 ilustra las gráficas de Box Plot, donde se detalla el comportamiento de la RTc del suelo en cuanto a las profundidades, ventanas paisajísticas (Sistemas) y los diferentes usos del suelo.



**Figura 49. Cambios en la resistencia tangencial al corte en diferentes profundidades, ventanas paisajísticas y usos del suelo.**

Figura 49 (a) La profundidad de 20-40 cm presentó la menor variabilidad en los datos de resistencia tangencial al corte, el 75% de los datos tuvieron valores de resistencia tangencial al corte inferiores a 40 kPa, contrariamente, la profundidad de 0-10 cm presentó los datos más dispersos, donde el 75% es inferior a 80 kPa. Figura 49 (b) La ventana agroforestal (CAF) tuvo la menor variabilidad en los datos de resistencia tangencial al corte, el 75% de los datos tuvieron una resistencia tangencial al corte inferior a 50 kPa. Contrario a esto, el sistema tradicional (CTR) tuvo datos más dispersos y el 75% de los datos tuvieron un valor inferior a 80 kPa, y el 50% de los datos estuvieron por debajo de 63 kPa. Figura 49 (c) El uso pasto limpio (PL) presentó la mayor variabilidad en los datos de resistencia tangencial al corte, el 75% de los datos tuvieron una RTc de 65 kPa, mientras que el uso agroforestal (PA) tuvo los datos menos dispersos y el 75% de los datos fue inferior a 57 kPa.

### 4.3.3. Análisis de las Propiedades Físicas Volumétricas

#### ▪ 4.3.3.1. Porosidad Total

La porosidad total presentó los valores más altos en el sistema tradicional hasta 75%, mientras los valores más bajos en el sistema silvopastoril 45.49% (**Tabla 8**). La figura 50 ilustra las gráficas de Box Plot, donde se detalla el comportamiento de la porosidad total del suelo en cuanto a las profundidades, ventanas paisajísticas (sistemas) y los diferentes usos del suelo.

**Tabla 8. Propiedades Físicas (Volumétricas) del suelo: Porosidad Total (%), Humedad Gravimétrica (%), Macroporos (%), Mesoporos (%), Microporos (%) y Conductividad Hidráulica (cm/h).**

| VARIABLE                             | PROFUNDIDAD<br>(cm) | R*              | SISTEMA<br>TRADICIONAL | SISTEMA<br>SILVOPASTORIL | SISTEMA<br>AGROFORESTAL |
|--------------------------------------|---------------------|-----------------|------------------------|--------------------------|-------------------------|
|                                      |                     | M**<br>D. S**** | n <sup>1</sup> =9      | n <sup>2</sup> =9        | n <sup>3</sup> =9       |
| POROSIDAD TOTAL<br>(%)               | 0-10 cm             | R*              | 52,76-75,00            | 52,19-63,64              | 55,04-64,34             |
|                                      |                     | M**             | 63.88                  | 56.64                    | 58.35                   |
|                                      |                     | D. S****        | 5.58                   | 3.82                     | 3.15                    |
|                                      | 10-15 cm            | R*              | 52,76-66,02            | 48,61-58,02              | 53,10-65,04             |
|                                      |                     | M**             | 57.63                  | 54.14                    | 57.04                   |
|                                      |                     | D. S****        | 4.67                   | 3.44                     | 3.71                    |
| 20-40 cm                             | R*                  | 49,42-62,50     | 45,49-58,78            | 48,31-64,29              |                         |
|                                      | M**                 | 56.02           | 52.44                  | 54.86                    |                         |
|                                      | D. S****            | 4.46            | 3.78                   | 4.91                     |                         |
| HUMEDAD<br>GRAVIMETRICA<br>CAMPO (%) | 0-10 cm             | R*              | 20.99-48.36            | 21.70-47.91              | 17.90-37.91             |
|                                      |                     | M**             | 31.66                  | 30.44                    | 29.88                   |
|                                      |                     | D. S****        | 7.71                   | 7.61                     | 5.70                    |
|                                      | 10-15 cm            | R*              | 23.81-38.36            | 19.82-34.05              | 28.95-26.13             |
|                                      |                     | M**             | 28.43                  | 26.59                    | 27.27                   |
|                                      |                     | D. S****        | 4.47                   | 4.18                     | 2.90                    |
|                                      | 20-40 cm            | R*              | 11.43-17.49            | 9.70-15.58               | 13.52-10.57             |
|                                      |                     | M**             | 13.77                  | 13.15                    | 12.58                   |
|                                      |                     | D. S****        | 1.99                   | 2.15                     | 1.73                    |
| MACROPOROSIDAD<br>(%)                | 0-10 cm             | R*              | 6,39-17,08             | 8,71-15,39               | 10,12-18,39             |
|                                      |                     | M**             | 10.45                  | 12.21                    | 15.44                   |
|                                      |                     | D. S****        | 3.25                   | 2.15                     | 2.59                    |
|                                      | 10-15 cm            | R*              | 3,25-19,36             | 7,54-13,16               | 6,62-16,76              |
|                                      |                     | M**             | 10.18                  | 9.43                     | 12.68                   |
|                                      |                     | D. S****        | 4.91                   | 1.82                     | 3.28                    |
|                                      | 20-40 cm            | R*              | 8,29-15,19             | 6,64-11,91               | 9,33-19,65              |
|                                      |                     | M**             | 11.46                  | 9.15                     | 13.4                    |
|                                      |                     | D. S****        | 2.28                   | 1.51                     | 3.97                    |
| MESOPOROSIDAD<br>(%)                 | 0-10 cm             | R*              | 5,25-8,99              | 5,37-8,56                | 5,33-9,29               |
|                                      |                     | M**             | 7.52                   | 6.33                     | 6.61                    |
|                                      |                     | D. S****        | 1.22                   | 1.14                     | 1.20                    |
|                                      | 10-15 cm            | R*              | 4,35-8,02              | 3,29-19,01               | 4,03-6,50               |
|                                      |                     | M**             | 5.41                   | 5.97                     | 5.04                    |
|                                      |                     | D. S****        | 1.06                   | 4.98                     | 0.75                    |
| 20-40 cm                             | R*                  | 3,16-5,19       | 3,47-18,67             | 3,76-5,72                |                         |
|                                      | M**                 | 4.3             | 5.73                   | 4.69                     |                         |
|                                      | D. S****            | 0.67            | 4.89                   | 0.63                     |                         |
| 0-5 cm                               | R*                  | 27,28-45,67     | 32,12-43,18            | 29,86-40,63              |                         |
|                                      | M**                 | 39.42           | 38.26                  | 36.49                    |                         |

|  |          |            |             |             |             |
|--|----------|------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>MICROPOROSIDAD (%)</b>              | 10-15 cm | D. S****   | 5.37        | 2.99        | 3.13        |
|  |          | R*         | 30,35-45,76 | 20,02-41,37 | 30,60-38,61 |
|  | 20-40 cm | M**        | 38.08       | 35.88       | 34.26       |
|  |          | D. S****   | 4.77        | 6.55        | 2.71        |
|  | 0-10 cm  | R*         | 30,76-46,74 | 21,19-40,44 | 27,46-39,81 |
|  |          | M**        | 37.69       | 35.79       | 32.97       |
| <b>CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA (cm/h)</b> | 10-15 cm | D. S****   | 4.52        | 6.07        | 3.92        |
|  |          | R*         | 1,60-28,70  | 1,60-19,70  | 108,80-3,30 |
|  | 20-40 cm | M**        | 10.48       | 15.18       | 45.42       |
|  |          | D. S****   | 9.19        | 14.01       | 34.26       |
|  | 10-15 cm | R*         | 0,10-10,80  | 0,10-7,30   | 0,10-76,00  |
|  |          | M**        | 3.73        | 1.88        | 24.22       |
| 20-40 cm                               | D. S**** | 3.65       | 2.82        | 28.47       |             |
|  | R*       | 0,40-13,30 | 0,10-4,20   | 0,50-48,10  |             |
|  | M**      | 5.58       | 0.93        | 15.39       |             |
|  | D. S**** | 5.15       | 1.26        | 19.86       |             |

R\*= Rango; M\*\*= Media; D.S\*\*\*\*= Desviación estándar; n=9= Número de Fincas en la ventana

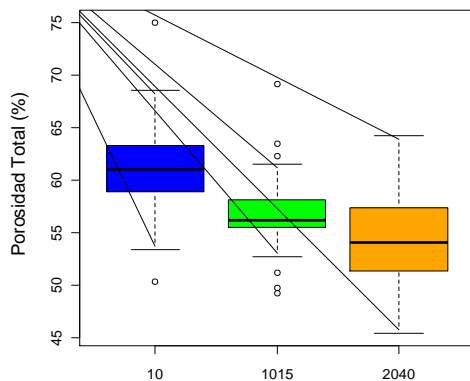


Figura 50 (a) Profundidad (cm)

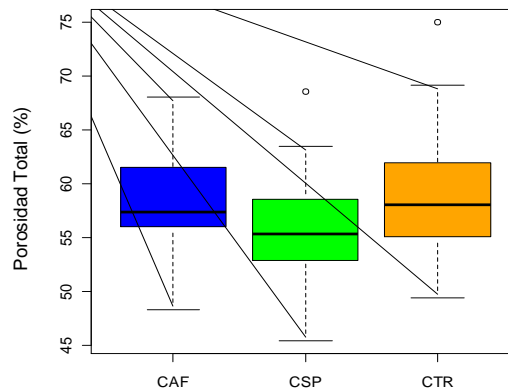


Figura 50 (b) Ventanas Paisajísticas

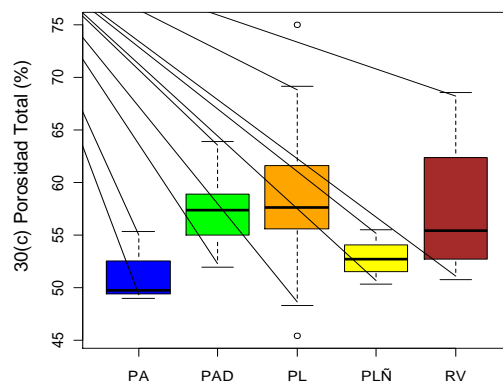


Figura 50 (c) Usos del Suelo

**Figura 50. Cambios en la porosidad total en diferentes profundidades, ventanas paisajísticas y usos del suelo.**

Figura 50 (a). La profundidad de 10-15 cm presentó la menor dispersión en los datos de porosidad total, el 75% presentó valores inferiores a 60%. Figura 50 (b). La ventana agroforestal (CAF) tuvo la menor variabilidad en los datos de porosidad total, el 75% de los datos tuvieron una porosidad total inferior a 65%, Contrario a esto, el sistema tradicional (CTR) tuvo datos más dispersos y el 75% de los datos tuvieron un valor inferior a 65%, presentando valores máximos extremos de 75%, mientras que los valores más bajos se presentaron en el sistema silvopastoril (CSP), 45.49%. Figura 50 (c). El uso pasto con leñosas (PLÑ) presentó la menor variabilidad en los datos de porosidad total, el 75% de los datos tuvieron una porosidad total menor de 55%, mientras que el uso Barbecho Viejo (RV) tuvo los datos más dispersos y el 75% de los datos fue inferior a 65%.

▪ **4.3.3.2. Humedad Gravimétrica**

El análisis de la humedad gravimétrica evidenció que los valores más altos se presentaron en el sistema tradicional con 48.36%, mientras los valores más bajos se presentaron en el sistema silvopastoril con 9.70%. (Tabla 8). La figura 51 ilustra las gráficas de Box Plot, donde se detalla el comportamiento de la

humedad del suelo en cuanto a las profundidades, ventanas paisajísticas (sistemas) y los diferentes usos del suelo.

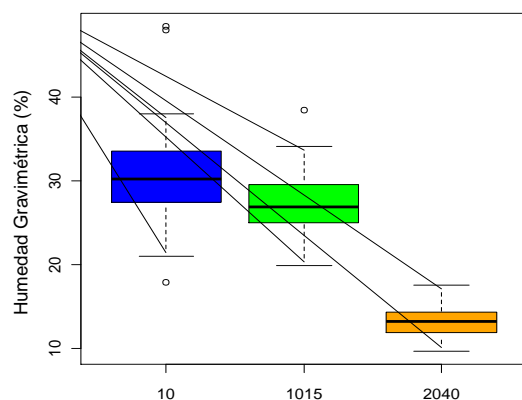


Figura 51 (a) Profundidad (cm)

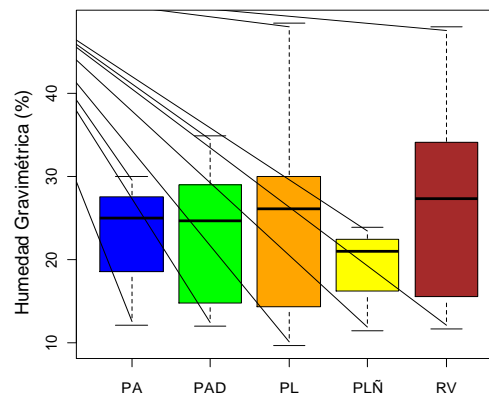


Figura 51 (b) Usos del Suelo

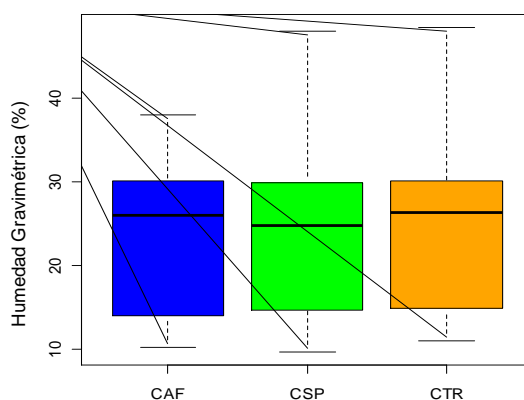


Figura 51 (c) Ventanas Paisajísticas

**Figura 51. Cambios en la humedad gravimétrica en diferentes profundidades, ventanas paisajísticas y usos del suelo.**

Figura 51 (a). La profundidad 20-40 cm presentó la menor variabilidad de los datos para humedad, el 75% de los datos presentó valores por debajo de 15% de humedad. Figura 51 (b). La ventana agroforestal (CAF) tuvo la menor variabilidad en los datos de humedad, el 75% de los datos tuvieron una humedad inferior a 30%. Contrario a esto, el sistema tradicional (CTR) tuvo datos más dispersos y el 75% de los datos tuvieron un valor inferior a 31%. Figura 51 (c). El uso pasto con leñosas (PLÑ) presentó la menor variabilidad en los datos de humedad, el 75%

de los datos tuvieron una humedad menor de 25%, mientras que el uso pasto limpio (PL) tuvo los datos más dispersos y el 75% de los datos fue inferior a 30%.

#### ▪ 4.3.3.3. Macroporosidad

La macroporosidad del suelo presentó los valores más altos en el sistema agroforestal con 19.65%, mientras los valores más bajos se presentaron en el sistema tradicional 3.25% (**Tabla 8**). La figura 52 ilustra las gráficas de Box Plot, donde se detalla el comportamiento de la Macroporosidad del suelo en cuanto a las profundidades, ventanas paisajísticas (Sistemas) y los diferentes usos del suelo.

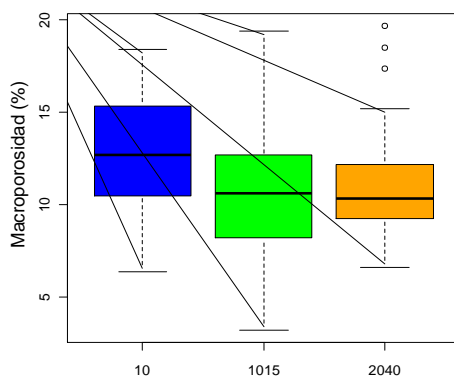


Figura 52 (a) Profundidad (cm)

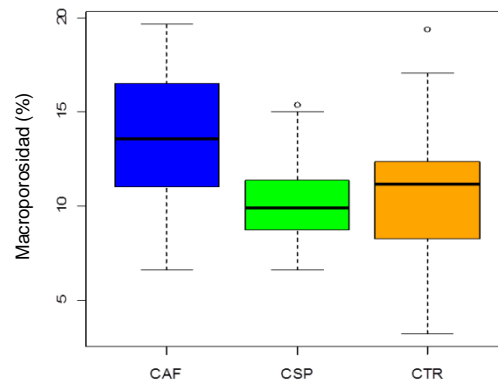


Figura 52 (b) Ventanas Paisajísticas

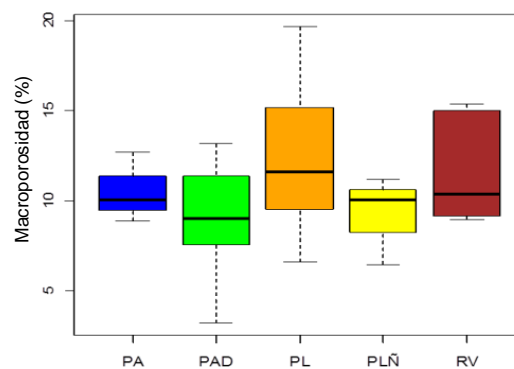


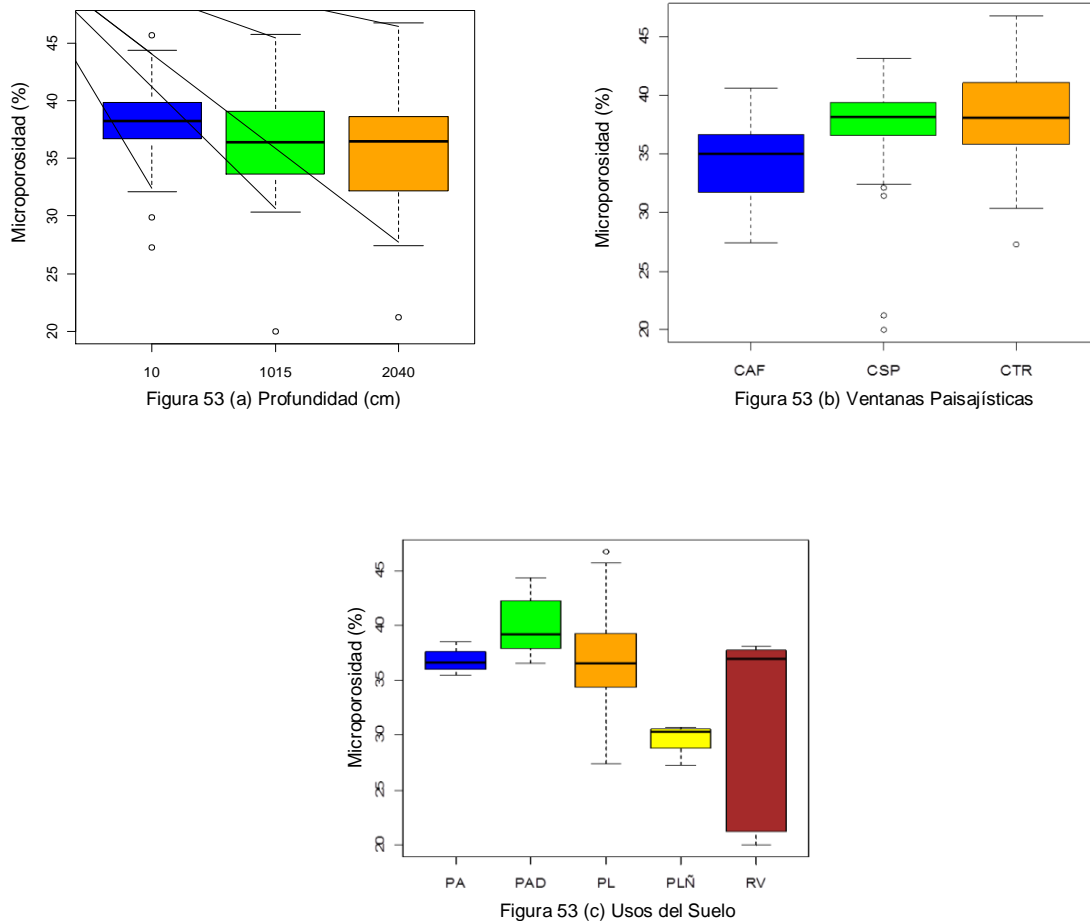
Figura 52 (c) Usos del Suelo

**Figura 52. Cambios en la macroporosidad en diferentes profundidades, ventanas paisajísticas y usos del suelo.**

Figura 52 (a). La profundidad 20-40 cm presentó la menor variabilidad de los datos para macroporosidad, el 75% de los datos presentó valores por debajo de 13% de macroporosidad, presentando valores máximos extremos hasta de 19.65%. Figura 52 (b). La ventana silvopastoril (CSP) tuvo la menor variabilidad en los datos de macroporosidad, el 75% de los datos tuvieron una macroporosidad inferior a 12%, con valores máximos extremos hasta de 15.39%. Contrario a esto, el sistema agroforestal (CAF) tuvo datos más dispersos y el 75% de los datos tuvieron un valor inferior a 18%. Figura 52 (c). El uso agroforestal (PA) presentó la menor variabilidad en los datos de macroporos, el 75% de los datos tuvieron una macroporosidad menor de 13%, mientras que el uso pasto limpio (PL) tuvo los datos más dispersos y el 75% de los datos fue inferior a 15%.

**▪ 4.3.3.4. Microporosidad**

El análisis de microporosidad presenta los valores más altos en el sistema tradicional con 46.74%, mientras los valores más bajos se presentaron en el sistema silvopastoril 20.02% (**Tabla 8**). La figura 53 ilustra las gráficas de Box Plot, donde se detalla el comportamiento de la Microporosidad del suelo en cuanto a las profundidades, ventanas paisajísticas (sistemas) y los diferentes usos del suelo.



**Figura 53. Cambios en la microporosidad en diferentes profundidades, ventanas paisajísticas y usos del suelo.**

Figura 53 (a). La profundidad 0-10 cm presentó la menor variabilidad de los datos para microporosidad (%), el 75% de los datos presentó valores por debajo de 40% de microporosidad, presentando valores máximos extremos de 46.74%. Figura 53 (b). La ventana silvopastoril (CSP) tuvo la menor variabilidad en los datos de microporosidad, el 75% de los datos tuvieron una microporosidad inferior a 40%. Contrario a esto, el sistema tradicional (CTR) tuvo datos más dispersos y el 75% de los datos tuvieron un valor inferior a 42%. Figura 53 (c). El uso agroforestal (PA) presentó la menor variabilidad en los datos de microporosidad, el 75% de los datos tuvieron una microporosidad menor de 38%, mientras que el

uso barbecho viejo (RV) tuvo los datos más dispersos y el 75% de los datos fue inferior a 40%.

#### 4.3.3.5. Conductividad Hidráulica

La conductividad hidráulica presentó los valores más altos en el sistema agroforestal con 108.08 cm/h, mientras los valores más bajos se presentaron iguales para los tres sistemas evaluados 0.10 cm/h (**Tabla 8**). La figura 54 ilustra las gráficas de Box Plot, donde se detalla el comportamiento de la conductividad hidráulica del suelo en cuanto a las profundidades, ventanas paisajísticas (sistemas) y los diferentes usos del suelo.

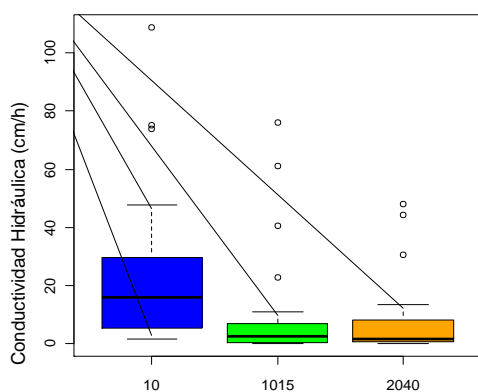


Figura 54 (a) Profundidad (cm)

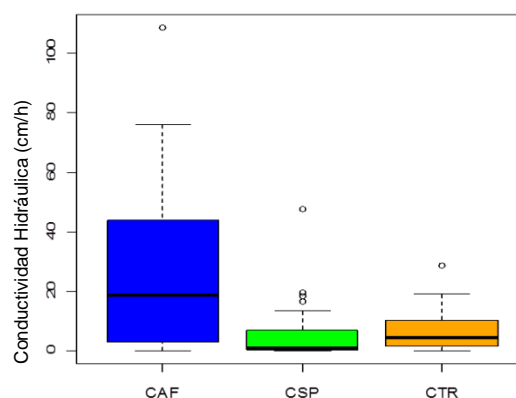
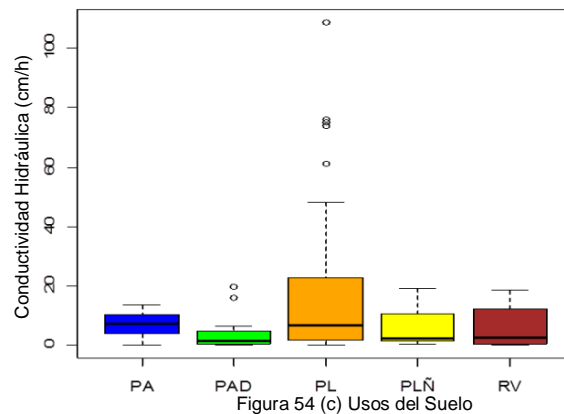


Figura 54 (b) Ventanas Paisajísticas



**Figura 54. Cambios en la conductividad hidráulica en diferentes profundidades, ventanas paisajísticas y usos.**

Figura 54 (a). La profundidad 10-15 cm presentó la menor variabilidad de los datos para Kh, el 75% de los datos presentó valores por debajo de 10 cm/h de Kh, presentando valores máximos extremos hasta de 76 cm/h. Figura 54 (b). La ventana silvopastoril (CSP) tuvo la menor dispersión en los datos de Kh, el 75% de los datos tuvieron una Kh inferior a 10 cm/h, con valores extremos máximos por encima de 40 cm/h. Contrario a esto, el sistema agroforestal (CAF) tuvo datos más dispersos y el 75% de los datos tuvieron un valor inferior a 50 cm/h. Figura 54 (c). El uso pasto con árboles dispersos (PAD) presentó la menor variabilidad en los datos de Kh, el 75% de los datos tuvieron una Kh menor de 10 cm/h, con valores extremos máximos de 19.70 cm/h, mientras que el uso pasto limpio (PL) tuvo los datos más dispersos y el 75% de los datos fue inferior a 30 cm/h, con valores extremos máximos hasta de 108.08 cm/h.

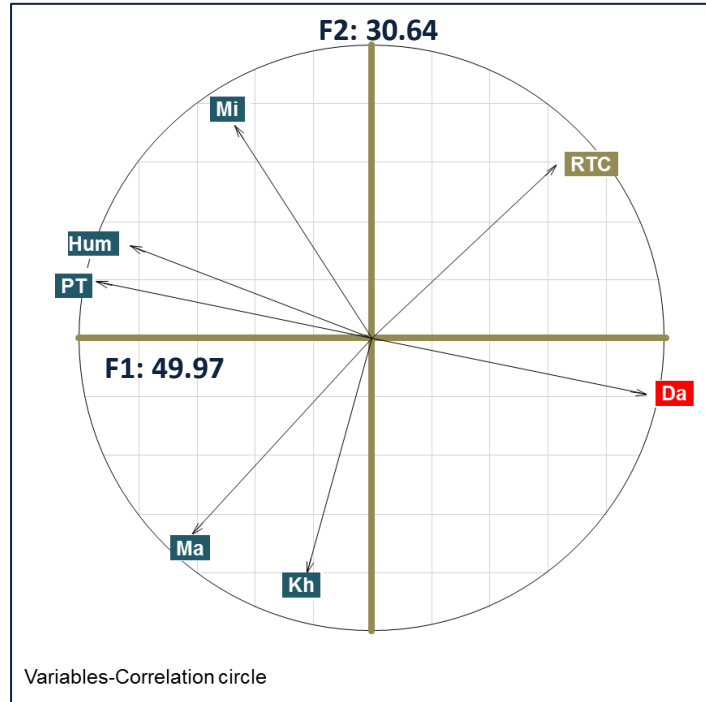
## 4.4. Análisis de la Etapa 2-B

En esta etapa se evaluaron 27 puntos a profundidad de 0-10 cm y siete (7) variables:

- **Mecánico** (Densidad aparente (Da), resistencia tangencial al corte (RTC)).
- **Volumétrico** (Porosidad total (PT), humedad (H), Macroporosidad (Ma), Microporosidad (Mi), Conductividad Hidráulica (Kh)).

### 4.4.1. Análisis de Componentes Principales ACP (Etapa 2-B: 27 puntos 0-10 cm y 7 variables)

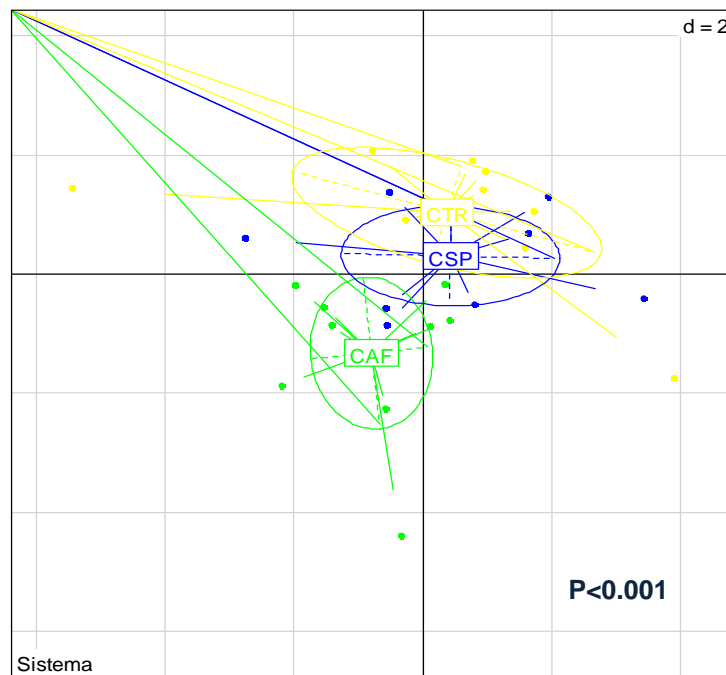
Los factores 1 y 2 del análisis de componentes principales explican el 80.61% de la variabilidad de los datos, El factor 1 explica el 49.97% de la variabilidad de los datos y separa los sistemas de uso del suelo en función de las variables: porosidad total, humedad y microporosidad. El Factor 2 explica el 30.64% y separa los usos en función de las variables: resistencia tangencial al corte, densidad aparente, macroporosidad y conductividad hidráulica (Figura 55).



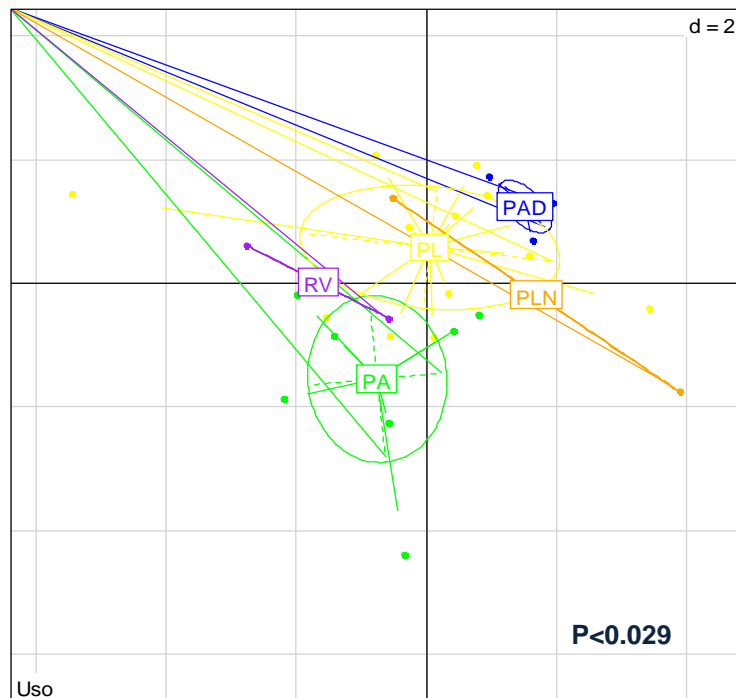
Da: densidad aparente, RTC: resistencia tangencial al corte, PT: porosidad total, Hum: humedad, Ma: macroporosidad, Mi: microporosidad, Kh: conductividad hidráulica.

**Figura 55. Análisis de Componentes Principales ACP Correlación de Variables y valor de la explicación de los Factores 1 y 2.**

La figura 56 (a) ilustra cómo el análisis de componentes principales ACP separó en forma significativa ( $p < 0.01$ ) las ventanas paisajísticas Tradicional CTR, Silvopastoril CSP y Agroforestal CAF. En la figura 56 (b) se observa la separación significativa ( $p < 0.029$ ) de los diferentes usos del suelo en función de las variables Pasto Limpio PL, Pasto con Árboles Dispersos PAD, Pasto con Leñosas PLÑ, Barbecho Viejo RV y Sistema Agroforestal PA.



56 (a) Ventanas Paisajísticas (Sistemas)



56 (b) Usos del Suelo (PAD: Pasto con árboles dispersos, PL: Pasto limpio, PLN: Pasto con leñosas, RV: Barbecho viejo, PA: Agroforestal)

**Figura 56. Análisis de componentes principales distribución por (a) Ventanas Paisajísticas (Sistemas) y Usos del Suelo.**

## 4.4.2. Análisis de las Propiedades Físicas Mecánicas

### 4.4.2.1. Densidad Aparente

El análisis de la densidad aparente del suelo presentó los valores más altos en el sistema tradicional con  $1.26 \text{ gr/cm}^3$ , así mismo, los valores más bajos se presentaron en el sistema tradicional  $0.64 \text{ gr/cm}^3$ . (**Tabla 9**). La figura 57 ilustra las gráficas de Box Plot, donde se detalla el comportamiento de la Densidad Aparente del suelo en cuanto a las ventanas paisajísticas (sistemas) y los diferentes usos del suelo.

**Tabla 9. Propiedades Físicas (Mecánicas) del suelo: D. Aparente ( $\text{gr/cm}^3$ ) y RTC (kPa).**

| VARIABLE                            | PROFUNDIDAD | R*<br>M**<br>D. S*** | SISTEMA<br>TRADICIONAL<br>n <sup>1</sup> =9 | SISTEMA<br>SILVOPASTORIL<br>n <sup>2</sup> =9 | SISTEMA<br>AGROFORESTAL<br>n <sup>3</sup> =9 |
|-------------------------------------|-------------|----------------------|---|---|--|
| D. APARENTE<br>( $\text{gr/cm}^3$ ) | 0-10        | R*                   | 0.64-1.26                                   | 0.83-1.24                                     | 0.85-1.06                                    |
|                                     |             | M**                  | 1.00  | 1.03  | 0.96   |
|                                     |             | D. S***              | 0.17  | 0.11  | 0.08   |
| RTC<br>(kPa)                        | 0-10        | R*                   | 29.76-80.51                                 | 35.59-91.34                                   | 32.34-57.09                                  |
|                                     |             | M**                  | 66.47                                       | 60.35   | 41.26  |
|                                     |             | D. S***              | 15.83                                       | 18.38   | 7.88   |

R\*= Rango; M\*\*= Media; D.S\*\*\*= Desviación estándar; n=9= Número de Fincas en la ventana

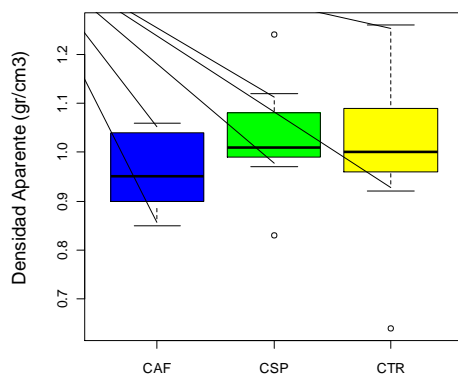


Figura 57 (a) Ventanas Paisajísticas

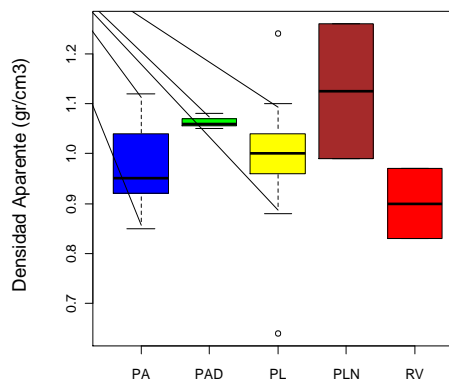


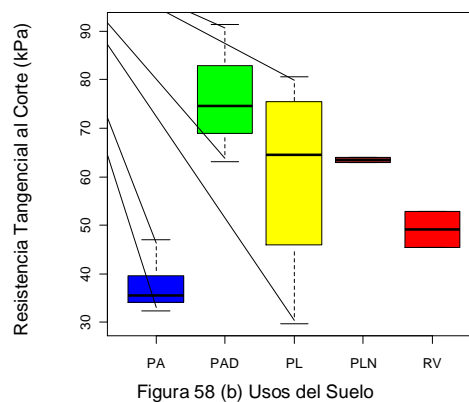
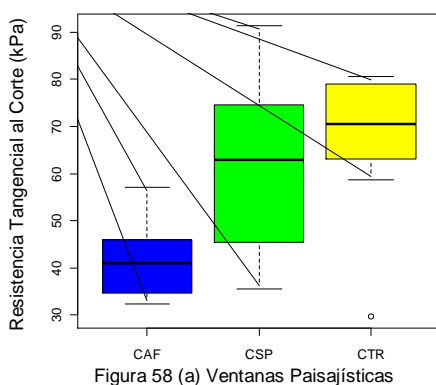
Figura 57 (a) Usos del Suelo

**Figura 57. Cambios en la densidad aparente en diferentes ventanas paisajísticas y usos del Suelo.**

Figura 57 (a). La ventana tradicional (CTR) tuvo la mayor variabilidad en los datos de densidad aparente, el 75% de los datos tuvieron densidad aparente inferiores a  $1.1 \text{ gr/cm}^3$ , presentando el valor más alto con  $1.26 \text{ gr/cm}^3$  y el valor extremo más bajo con  $0.64 \text{ gr/m}^3$ . El valor más bajo se presentó en el sistema agroforestal (CAF) con  $0.85 \text{ gr/cm}^3$ . Por su parte, el sistema silvopastoril (CSP) presentó la menor variabilidad en los datos, oscilando entre  $0.83$  y  $1.24 \text{ gr/cm}^3$ . Figura 57 (b) El uso pasto con árboles dispersos (PAD) presentó la menor variabilidad en los datos de densidad aparente, oscilando entre  $1.05$  a  $1.08 \text{ gr/cm}^3$ , mientras que el uso pasto con leñosas (PLN) tuvo los datos más dispersos, oscilando entre  $0.99$  y  $1.26 \text{ gr/cm}^3$ , respectivamente.

#### 4.4.2.2. Resistencia Tangencial al Corte

La resistencia tangencial al corte presentó los valores más altos en el sistema silvopastoril (CSP) con  $91.34 \text{ kPa}$ , mientras los valores más bajos se presentaron en el sistema tradicional (CTR) con  $29.76 \text{ kPa}$  (**Tabla 9**). La figura 58 ilustra las gráficas de Box Plot, donde se detalla el comportamiento de la resistencia tangencial al corte del suelo en cuanto a las ventanas paisajísticas (sistemas) y los diferentes usos.



**Figura 58. Cambios en la resistencia tangencial al corte en diferentes ventanas paisajísticas y usos del Suelo.**

Figura 58 (a). La ventana silvopastoril (CSP) tuvo la mayor variabilidad en los datos de resistencia tangencial al corte, el 75% de los datos tuvieron valores inferiores a 92 kPa, presentando el valor más alto con 91.34 kPa. El valor más bajo se presentó en el sistema agroforestal (CAF) con 32.34 kPa. Por su parte, el sistema agroforestal (CAF) presentó la menor variabilidad en los datos, oscilando entre 32.34 y 57.09 kPa. Figura 58 (b) El uso pasto con leñosas (PLN) presentó la menor variabilidad en los datos de resistencia tangencial al corte, oscilando entre 62.93 a 64.01 kPa, mientras que el uso pasto limpio (PL) tuvo los datos más dispersos, oscilando entre 29.76 y 80.51 kPa, respectivamente.

### **4.4.3. Análisis de las Propiedades Físicas Volumétricas**

#### **▪ 4.4.3.1. Porosidad Total**

El análisis de la porosidad total presentó los valores más altos en el sistema tradicional (CTR) con 75%, así mismo, los valores más bajos con 50.39% (**Tabla 10**). La figura 59 ilustra las gráficas de Box Plot, donde se detalla el comportamiento de la porosidad total del suelo en cuanto a las ventanas paisajísticas (sistemas) y los diferentes usos del suelo.

**Tabla 10. Propiedades Físicas (Volumétricas) del suelo: Porosidad Total (%), Humedad Gravimétrica (%), Macroporosidad (%), Microporosidad (%), Conductividad Hidráulica (cm/h).**

| VARIABLE                        | PROFUNDIDAD | R*      | SISTEMA           | SISTEMA           | SISTEMA           |
|---------------------------------|-------------|---------|-------------------|-------------------|-------------------|
|                                 |             |         | TRADICIONAL       | SILVOPASTORIL     | AGROFORESTAL      |
|                                 |             | M**     | n <sup>1</sup> =9 | n <sup>2</sup> =9 | n <sup>3</sup> =9 |
|                                 |             | D. S*** |                   |                   |                   |
| POROSIDAD TOTAL (%)             | 0-10        | R*      | 50.39-75.0        | 53.38-68.56       | 59.23-68.05       |
|                                 |             | M**     | 61.07             | 60.31             | 62.76             |
|                                 |             | D. S*** | 6.57              | 4.53              | 3.13              |
| HUMEDAD GRAVIMÉTRICA (%)        | 0-10        | R*      | 20.99-48.36       | 21.70-47.91       | 17.90-37.91       |
|                                 |             | M**     | 31.66             | 30.44             | 29.88             |
|                                 |             | D. S*** | 7.71              | 7.61              | 5.70              |
| MACROPOROSIDAD (%)              | 0-10        | R*      | 6.39-17.08        | 8.71-15.39        | 10.12-18.39       |
|                                 |             | M**     | 10.45             | 12.21             | 15.44             |
|                                 |             | D. S*** | 3.25              | 2.15              | 2.59              |
| MICROPOROSIDAD (%)              | 0-10        | R*      | 27.28-45.67       | 32.12-43.18       | 29.86-40.63       |
|                                 |             | M**     | 39.42             | 38.26             | 36.49             |
|                                 |             | D. S*** | 5.37              | 2.99              | 3.13              |
| CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA (cm/h) | 0-10        | R*      | 1.60-28.70        | 1.60-47.80        | 3.30-108.80       |
|                                 |             | M**     | 10.48             | 15.18             | 45.42             |
|                                 |             | D. S*** | 9.19              | 14.01             | 34.26             |

R\*= Rango; M\*\*= Media; D.S\*\*\*= Desviación estándar; n: Número de Fincas en la ventana

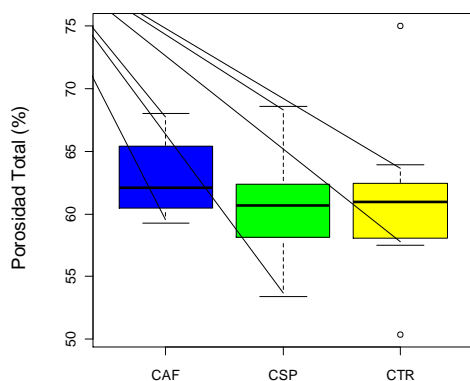


Figura 59 (a) Ventanas Paisajísticas

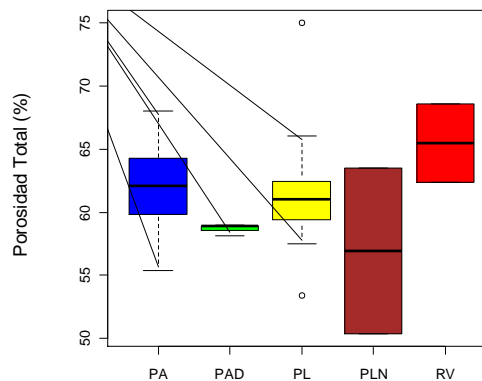


Figura 59 (b) Usos del Suelo

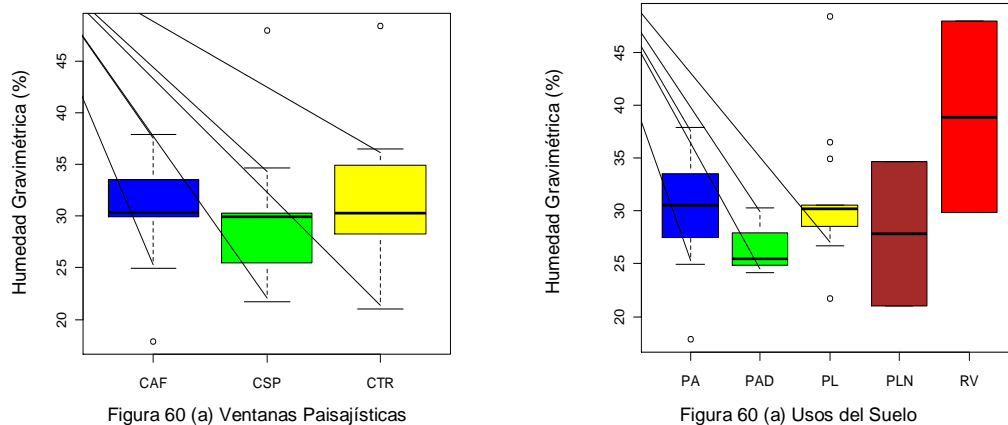
**Figura 59. Cambios en la porosidad total en diferentes ventanas paisajísticas y usos del Suelo.**

Figura 59 (a). La ventana silvopastoril (CSP) tuvo la mayor variabilidad en los datos de porosidad total, el 75% de los datos tuvieron porosidad total inferior a 63%, presentando el valor más alto con 68.56%. El valor más bajo también se

presentó en el sistema silvopastoril con 53.38%. Por su parte, el sistema tradicional (CTR) presentó la menor variabilidad en los datos, con valores entre 58.08 y 63.92%, presentando un valor extremo alto de 75% y un valor extremo bajo de 50.39%. Figura 59 (b) El uso pasto con árboles dispersos (PAD) presentó la menor variabilidad en los datos de porosidad total, con valores entre 58.14 a 58.98%, mientras que el uso pasto con leñosas (PLN) tuvo los datos más dispersos, oscilando entre 50.39 y 63.47%, respectivamente.

#### 4.4.3.2. Humedad Gravimétrica

La humedad gravimétrica presentó los valores más altos en el sistema tradicional (CTR) con 48.36%, mientras los valores más bajos se presentaron en el sistema agroforestal (CAF) con 17.90% (**Tabla 10**). La figura 60 ilustra las gráficas de Box Plot, donde se detalla el comportamiento de la humedad del suelo en cuanto a las ventanas paisajísticas (sistemas) y los diferentes usos del suelo.



**Figura 60. Cambios en la humedad gravimétrica en diferentes ventanas paisajísticas y usos del Suelo.**

Figura 60 (a). La ventana tradicional (CTR) tuvo la mayor variabilidad en los datos de humedad, el 75% de los datos tuvieron humedad inferior a 40%, presentando un valor extremo alto de 48.36%. El valor más alto de humedad se presentó en el sistema agroforestal (CAF) con 37.91%, mientras el valor más bajo se presentó en el sistema tradicional con 20.99%. Por su parte, el sistema agroforestal (CAF) presentó la menor variabilidad en los datos, oscilando entre 17.90 y 37.91%. Figura 60 (b) El uso pasto limpio (PL) presentó la menor variabilidad en los datos de humedad, oscilando entre 21.70 a 48.36%, mientras que el uso barbecho viejo (RV) tuvo los datos más dispersos, oscilando entre 29.82 y 47.91%, respectivamente.

#### ▪ 4.4.3.3. Macroporosidad

La macroporosidad del suelo presentó los valores más altos en el sistema agroforestal (CAF) con 18.39%, mientras los valores más bajos se presentaron en el sistema tradicional (CTR) con 6.39 % (**Tabla 10**). La figura 61 ilustra las gráficas de Box Plot, donde se detalla el comportamiento de la macroporosidad del suelo en cuanto a las ventanas paisajísticas (sistemas) y los diferentes usos del suelo.

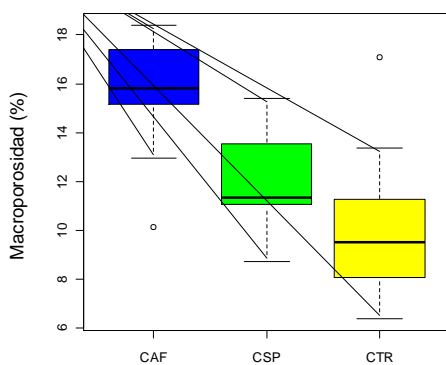


Figura 61 (a) Ventanas Paisajísticas

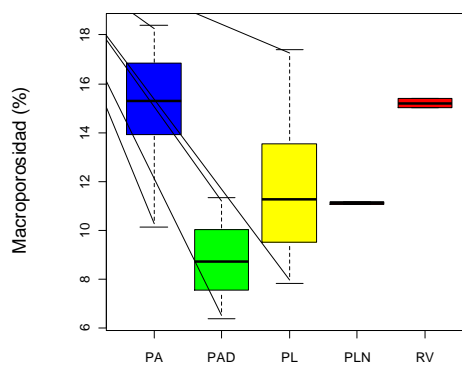


Figura 61 (b) Usos del Suelo

### Figura 61. Cambios en la macroporosidad en diferentes ventanas paisajísticas y usos del Suelo.

Figura 61 (a). La ventana tradicional (CTR) tuvo la mayor variabilidad en los datos de macroporosidad (Ma), el 75% de los datos tuvieron macroporosidad inferior a 12%, presentando un valor extremo alto de 17.08%. El valor más alto de macroporosidad se presentó en el sistema agroforestal (CAF) con 18.39%, mientras el valor más bajo se presentó en el sistema tradicional con 6.39%. Por su parte, el sistema agroforestal (CAF) presentó la menor variabilidad en los datos, oscilando entre 10.12 y 18.39%. Figura 61 (b) El uso pasto con leñosas (PLN) presentó la menor variabilidad en los datos de macroporosidad, con valores entre 11.07 y 11.17%, mientras que el uso pasto limpio (PL) tuvo los datos más dispersos, con valores entre 7.84 y 17.08%, respectivamente.

#### ▪ 4.4.3.4. Microporosidad

La microporosidad del suelo presentó los valores más altos en el sistema tradicional (CTR) con 45.67%, así mismo, los valores más bajos se presentaron en el sistema tradicional (CTR) con 27.28% (**Tabla 10**). La figura 62 ilustra las gráficas de Box Plot, donde se detalla el comportamiento de la microporosidad del suelo en cuanto a las ventanas paisajísticas (sistemas) y los diferentes usos del suelo.

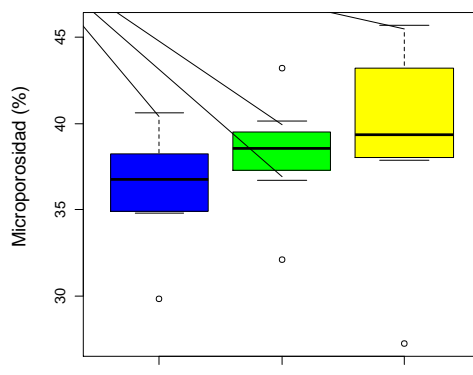


Figura 62 (a) Ventanas Paisajísticas

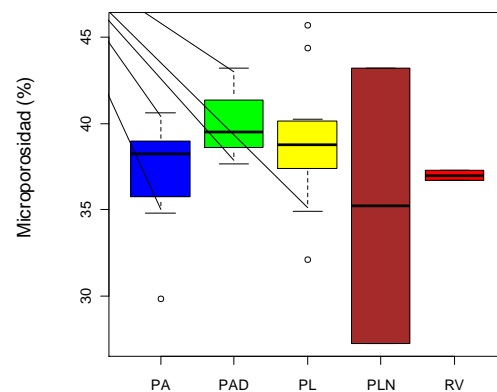


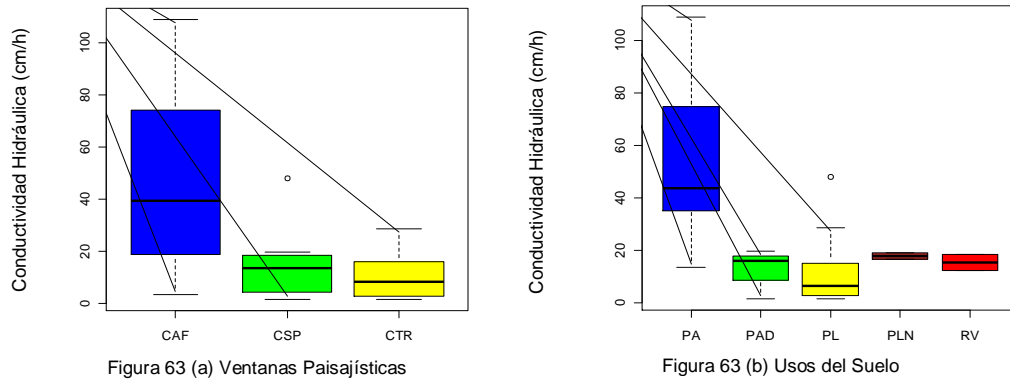
Figura 62 (b) Usos del Suelo

**Figura 62. Cambios en la microporosidad en diferentes ventanas paisajísticas y usos del Suelo.**

Figura 62 (a). La ventana tradicional (CTR) tuvo la mayor variabilidad en los datos de microporosidad (Mi), el 75% de los datos tuvieron microporosidad inferior a 45%, presentando un valor extremo bajo de 27.28%. El valor más alto de microporosidad se presentó en el sistema tradicional (CTR) con 45.67%, mientras el valor más bajo se presentó en el sistema agroforestal con 29.86%. Por su parte, el sistema silvopastoril (CSP) presentó la menor variabilidad en los datos, con valores entre 36.70 y 40.16%, presentando valores extremos altos de 43.18% y valores extremos bajos de 32.12%. Figura 62 (b) El uso pasto con leñosas (PLN) presentó la mayor variabilidad en los datos de microporosidad, con valores entre 27.28 y 43.18%, mientras que el uso barbecho viejo (RV) tuvo los datos menos dispersos, oscilando entre 36.70 y 37.28%, respectivamente.

**▪ 4.4.3.5. Conductividad Hidráulica**

La conductividad hidráulica del suelo presentó los valores más altos en el sistema agroforestal (CAF) con 108.80 cm/h, así mismo, los valores más bajos se presentaron en los sistemas tradicional (CTR) y silvopastoril (CSP) con 1.60 cm/h (**Tabla 10**). La figura 63 ilustra las gráficas de Box Plot, donde se detalla el comportamiento de la conductividad hidráulica del suelo en cuanto a las ventanas paisajísticas (sistemas) y los diferentes usos.



**Figura 63. Cambios en la conductividad hidráulica en diferentes ventanas paisajísticas y usos del Suelo.**

Figura 63 (a). La ventana agroforestal (CAF) tuvo la mayor variabilidad en los datos de conductividad hidráulica ( $K_h$ ), el 75% de los datos tuvieron conductividad hidráulica inferior a 80 cm/h, presentando el valor más alto de  $K_h$  con 108.80 cm/h, mientras el valor más bajo se presentó en los sistemas tradicional (CTR) y silvopastoril (CSP) con 1.60 cm/h. Por su parte, el sistema tradicional (CTR) presentó la menor variabilidad en los datos, con valores entre 1.60 y 28.70 cm/h. Figura 63 (b) El uso agroforestal (PA) presentó la mayor variabilidad en los datos de  $K_h$ , oscilando entre 13.50 y 108.80 cm/h, mientras que el uso pasto con leñosas (PLN) tuvo los datos menos dispersos, oscilando entre 16.60 y 19.10%, respectivamente.

## **Capítulo 4**

# **Construcción de los Indicadores de Calidad del Suelo**

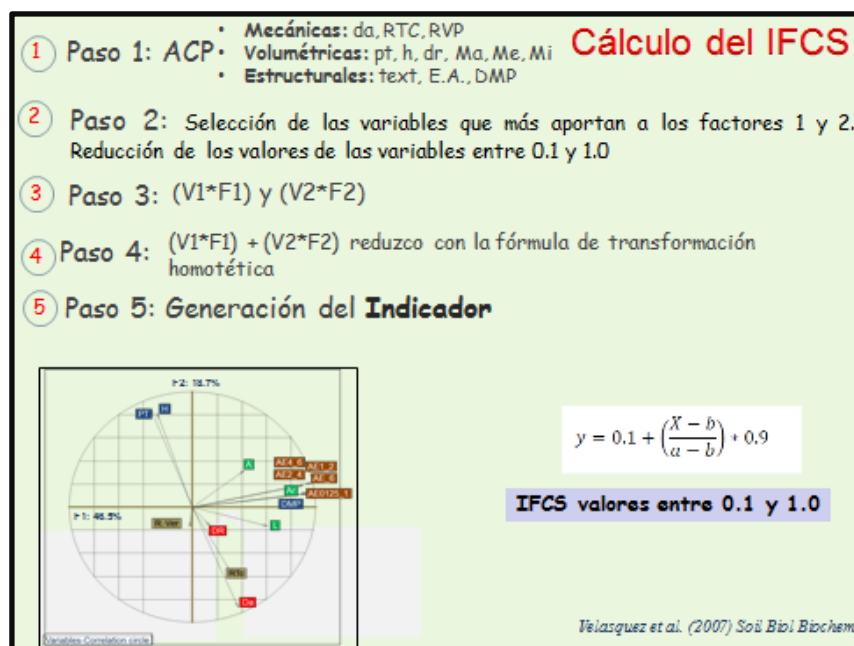
## 5. Construcción de los indicadores de calidad del suelo en cada etapa.

Se construyó un Indicador Físico de la Calidad del Suelo (IFCS) en cada una de las etapas descritas en los resultados (Figura 64), con el objetivo de diseñar la mejor estrategia de evaluación a nivel de paisaje (**Tabla 11**). El Indicador debe permitir: identificar, interpretar y evaluar problemas en el funcionamiento hídrico del suelo y proponer alternativas de manejo y uso sostenible del suelo en ecosistemas frágiles y altamente intervenidos como los del piedemonte amazónico.

**Tabla 11. Variables utilizadas en el análisis para la construcción de los indicadores.**

| Etapa  | Variables   |   |   |
|--|---|---|---|
|  | Mecánico  | Volumétrico   | Estructural   |
| <b>1-A</b><br><b>135 datos</b><br><b>0-10 cm</b><br><b>9 Variables</b>           | densidad aparente, resistencia tangencial al corte, resistencia vertical a la penetración | porosidad total, humedad, densidad real   | textura, estabilidad de agregados, diámetro medio ponderado |
| <b>1-B</b><br><b>27 datos</b><br><b>0-10 cm</b><br><b>9 Variables</b>            | densidad aparente, resistencia tangencial al corte, resistencia vertical a la penetración | porosidad total, humedad, densidad real   | textura, estabilidad de agregados, diámetro medio ponderado |
| <b>2-A</b><br><b>27 datos</b><br><b>0-10, 15-20, 20-40</b><br><b>7 Variables</b> | densidad aparente, resistencia tangencial al corte  | porosidad total, humedad, macroporosidad, mesoporosidad, microporosidad, conductividad hidráulica |   |
| <b>2-B</b><br><b>27 datos</b><br><b>0-10 cm</b><br><b>7 Variables</b>            | D.a, RTc  | porosidad total, humedad, macroporosidad, mesoporosidad, microporosidad, conductividad hidráulica |   |

A: Arena, L: Limo, Ar: Arcilla, Dr: Densidad Real, Da: Densidad Aparente, RTc: Resistencia Tangencial al Corte, RVp: Resistencia Vertical a la Penetración, PT: Porosidad Total, H°: Humedad, DMP: Diámetro Medio Ponderado, AE0125\_1: Estabilidad de Agregados Tamiz 0.125 – 1 mm, AE1\_2: Estabilidad de Agregados Tamiz 1 - 2 mm, AE2\_4: Estabilidad de Agregados Tamiz 2 - 4 mm, AE4\_6: Estabilidad de Agregados Tamiz 4 - 6 mm, AE\_6: Estabilidad de Agregados Tamiz >6 mm, DMP: Diámetro Medio Ponderado, Ma: Macroporosidad, Mi: Microporosidad, Kh: Conductividad Hidráulica.



**Figura 64. Pasos para la construcción del Indicador**

En cada una de las etapas, se seleccionaron las variables que mejor separan los diferentes tipos de uso del suelo en función de la calidad hídrica del suelo. Para esta selección se tuvo en cuenta el aporte de cada variable a la construcción de los dos primeros componentes en el Análisis de Componentes Principales y la varianza total explicada por los dos primeros componentes (>50%) Tablas 12 - 13.

**Tabla 12. Contribución de los factores 1 y 2 e inercia total en ACP de las diferentes variables del suelo en la Etapa 1.**

| Etapa            | Profundidad<br>cm | ACP*               |      | Ventana<br>p-Valor* | Usos del Suelo<br>p-Valor* |
|------------------|-------------------|--------------------|------|---------------------|----------------------------|
|                  |                   | Factor (% Inercia) | 2    |                     |                            |
| 1-A (135 Puntos) | 0-10              | 46.5               | 18.7 | 0.001               | 0.042                      |
| 1-B (27 Puntos)  | 0-10              | 36                 | 19.6 | 0.036               | 0.629                      |

**Tabla 13. Contribución de los factores 1 y 2 e inercia total en ACP de las diferentes variables del suelo en la Etapa 2.**

| Etapa           | Profundidad<br>cm  | ACP*                    |       | Ventana<br>p-Valor* | Usos del Suelo<br>p-Valor* | Profundidad<br>p-Valor* |
|-----------------|--------------------|-------------------------|-------|---------------------|----------------------------|-------------------------|
|                 |                    | Factor (% Inercia)<br>1 | 2     |                     |                            |                         |
| 2-A (27 Puntos) | 0-10, 10-15, 20-40 | 40.1                    | 25.1  | 0.001               | 0.015                      | 0.001                   |
| 2-B (27 Puntos) | 0-10               | 49.97                   | 30.64 | 0.001               | 0.029                      |                         |

Después de seleccionar las diferentes variables que más aportan en los dos primeros factores y de reducir sus valores originales en un rango entre 0.1 y 1.0, se multiplicó cada valor (reducido) por su contribución a la formación de los dos primeros componentes (F1 y F2). Estos productos se suman y se reducen nuevamente para obtener valores del indicador en un rango entre 0.1 y 1.0. De esta manera cada uno de los sitios evaluados obtiene un valor del indicador entre 0.1 y 1.0.

La metodología del indicador General de Calidad del Suelo GISQ es aplicable a cualquier grupo de sitios que necesitan una evaluación Metodológica comparativa. Sin embargo, pueden existir problemas en la selección de las variables cuando el indicador tiene que responder a una gran diversidad de objetivos. Por ejemplo, la comparación de la eficiencia de diferentes técnicas en un intento de rehabilitar los suelos degradados, evaluar los efectos de los diferentes sistemas de uso del suelo, las funciones ecológicas o la evaluación de una política general de recursos naturales y la protección de la biodiversidad (**Velásquez et al., 2007**).

La calidad de un indicador depende en gran medida de la calidad de las materias primas y datos utilizados para su construcción y su medida. La mayoría de los indicadores disponibles en la literatura no se han validado, ni su sensibilidad ha sido probada en una amplia gama de situaciones (**Velásquez, 2007**). Actualmente el GISQ está siendo validado en plantaciones de té en el sur de

China, la red francesa de monitoreo de la calidad del suelo (RMQS) y la red europea de zonas forestales RENECOFOR (Office National des Forets, 1996)

Se ilustra a continuación la construcción del Indicador de la Etapa 2-B: 27 puntos con siete (7) variables físicas a 0-10 cm de profundidad. La Tabla 14 muestra los valores originales de las variables y la Tabla 15 los valores reducidos a través de las fórmulas de transformación homotética 1 y 2.

Fórmula 1: se aplica cuando al aumentar el valor de la variable, aumenta la calidad del suelo:

$$y = 0.1 + \left( \frac{X - b}{a - b} \right) * 0.9$$

Formula 2: se aplica cuando al aumentar el valor de la variable, disminuye la calidad del suelo (ej. Densidad aparente; Resistencia Tangencial al Corte):

$$y = 1.1 - \left( 0.1 + \left( \frac{X - b}{a - b} \right) * 0.9 \right)$$

Donde “Y” es el valor de la variable después de transformada; “X” es el valor de la variable a transformar; “a” es el valor máximo alcanzado por la variable y “b” es el mínimo valor de la variable.

**Tabla 14. Valores originales de las variables en cada sitio de muestreo.**

| Ventana | Uso | Finca | punto | Ma    | Mi    | PT    | H°    | Kh    | Da   | RTc   |
|---------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|
| CTR     | PL  | 1     | 3     | 8.08  | 37.72 | 57.95 | 30.46 | 5.45  | 1.10 | 65.51 |
| CTR     | PL  | 2     | 3     | 9.86  | 38.67 | 62.16 | 30.78 | 4.30  | 1.02 | 71.53 |
| CTR     | PAD | 3     | 3     | 6.72  | 41.16 | 58.85 | 31.45 | 8.00  | 1.07 | 62.53 |
| CTR     | PL  | 4     | 3     | 6.31  | 43.83 | 63.14 | 36.05 | 0.85  | 0.95 | 57.24 |
| CTR     | PL  | 5     | 3     | 16.36 | 36.61 | 62.31 | 35.44 | 10.45 | 0.99 | 77.59 |
| CTR     | PL  | 6     | 3     | 16.15 | 45.72 | 73.96 | 46.17 | 4.30  | 0.70 | 38.11 |
| CTR     | PL  | 7     | 3     | 10.71 | 36.24 | 56.78 | 33.46 | 4.30  | 1.10 | 75.93 |
| CTR     | PL  | 8     | 3     | 9.85  | 40.02 | 58.69 | 29.81 | 16.55 | 1.10 | 72.17 |
| CTR     | PLN | 9     | 3     | 8.82  | 28.82 | 49.87 | 21.51 | 9.75  | 1.24 | 61.84 |
| CSP     | PL  | 10    | 3     | 10.11 | 32.26 | 52.76 | 22.96 | 2.00  | 1.28 | 72.74 |
| CSP     | RV  | 11    | 3     | 12.00 | 37.44 | 67.43 | 47.16 | 6.20  | 0.92 | 56.07 |
| CSP     | PA  | 12    | 3     | 11.40 | 37.01 | 55.25 | 30.33 | 10.40 | 1.16 | 47.43 |
| CSP     | RV  | 13    | 3     | 13.38 | 28.65 | 62.27 | 32.86 | 9.35  | 1.04 | 51.95 |
| CSP     | PAD | 14    | 3     | 12.26 | 37.11 | 58.27 | 26.12 | 3.90  | 1.10 | 73.55 |
| CSP     | PAD | 15    | 3     | 8.41  | 39.32 | 58.27 | 25.42 | 9.95  | 1.09 | 90.92 |
| CSP     | PL  | 16    | 3     | 9.82  | 40.32 | 60.70 | 31.06 | 2.65  | 1.04 | 68.26 |
| CSP     | PLN | 17    | 3     | 9.48  | 41.26 | 63.59 | 35.53 | 8.35  | 1.03 | 68.01 |
| CSP     | PL  | 18    | 3     | 10.54 | 40.26 | 62.21 | 33.34 | 23.95 | 1.02 | 56.76 |
| CAF     | PA  | 19    | 3     | 14.26 | 38.43 | 59.23 | 31.89 | 39.45 | 1.08 | 41.68 |
| CAF     | PA  | 20    | 3     | 10.49 | 36.22 | 60.08 | 26.39 | 26.70 | 1.01 | 37.61 |
| CAF     | PA  | 21    | 3     | 13.75 | 37.57 | 62.27 | 37.26 | 39.85 | 1.00 | 39.11 |
| CAF     | PL  | 22    | 3     | 16.84 | 34.09 | 64.48 | 32.65 | 38.10 | 0.96 | 34.92 |
| CAF     | PA  | 23    | 3     | 16.28 | 33.82 | 66.04 | 32.88 | 75.00 | 0.92 | 39.21 |
| CAF     | PA  | 24    | 3     | 15.45 | 38.53 | 64.23 | 36.59 | 25.25 | 0.98 | 43.67 |
| CAF     | PL  | 25    | 3     | 12.18 | 34.59 | 58.30 | 29.40 | 12.55 | 1.13 | 55.18 |
| CAF     | PA  | 26    | 3     | 15.99 | 30.23 | 59.43 | 26.30 | 54.80 | 1.07 | 35.03 |
| CAF     | PL  | 27    | 3     | 11.29 | 34.96 | 58.34 | 30.16 | 1.70  | 1.08 | 48.80 |

|          |       |       |       |       |       |      |       |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|
| <b>a</b> | 16.84 | 45.72 | 73.96 | 47.16 | 75.00 | 1.28 | 90.92 |
| <b>b</b> | 6.31  | 28.65 | 49.87 | 21.51 | 0.85  | 0.70 | 34.92 |

a: Valores Máximos

b: Valores Mínimos

**Tabla 15. Valores reducidos de las variables en cada sitio de muestreo.**

| Ventana | Uso | Finca | Ma   | Mi   | PT   | H°   | Kh   | Da   | RTc  |
|---------|-----|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| CTR     | PL  | 1     | 0.25 | 0.58 | 0.40 | 0.41 | 0.16 | 0.37 | 0.51 |
| CTR     | PL  | 2     | 0.40 | 0.63 | 0.56 | 0.43 | 0.14 | 0.51 | 0.41 |
| CTR     | PAD | 3     | 0.14 | 0.76 | 0.44 | 0.45 | 0.19 | 0.43 | 0.56 |
| CTR     | PL  | 4     | 0.10 | 0.90 | 0.60 | 0.61 | 0.10 | 0.62 | 0.64 |
| CTR     | PL  | 5     | 0.96 | 0.52 | 0.56 | 0.59 | 0.22 | 0.56 | 0.31 |
| CTR     | PL  | 6     | 0.94 | 1.00 | 1.00 | 0.97 | 0.14 | 1.00 | 0.95 |
| CTR     | PL  | 7     | 0.48 | 0.50 | 0.36 | 0.52 | 0.14 | 0.38 | 0.34 |
| CTR     | PL  | 8     | 0.40 | 0.70 | 0.43 | 0.39 | 0.29 | 0.39 | 0.40 |
| CTR     | PLN | 9     | 0.31 | 0.11 | 0.10 | 0.10 | 0.21 | 0.17 | 0.57 |
| CSP     | PL  | 10    | 0.42 | 0.29 | 0.21 | 0.15 | 0.11 | 0.10 | 0.39 |
| CSP     | RV  | 11    | 0.59 | 0.56 | 0.76 | 1.00 | 0.16 | 0.65 | 0.66 |
| CSP     | PA  | 12    | 0.54 | 0.54 | 0.30 | 0.41 | 0.22 | 0.29 | 0.80 |
| CSP     | RV  | 13    | 0.70 | 0.10 | 0.56 | 0.50 | 0.20 | 0.48 | 0.73 |
| CSP     | PAD | 14    | 0.61 | 0.55 | 0.41 | 0.26 | 0.14 | 0.38 | 0.38 |
| CSP     | PAD | 15    | 0.28 | 0.66 | 0.41 | 0.24 | 0.21 | 0.39 | 0.10 |
| CSP     | PL  | 16    | 0.40 | 0.72 | 0.50 | 0.44 | 0.12 | 0.47 | 0.46 |
| CSP     | PLN | 17    | 0.37 | 0.76 | 0.61 | 0.59 | 0.19 | 0.49 | 0.47 |
| CSP     | PL  | 18    | 0.46 | 0.71 | 0.56 | 0.52 | 0.38 | 0.51 | 0.65 |
| CAF     | PA  | 19    | 0.78 | 0.62 | 0.45 | 0.46 | 0.57 | 0.41 | 0.89 |
| CAF     | PA  | 20    | 0.46 | 0.50 | 0.48 | 0.27 | 0.41 | 0.52 | 0.96 |
| CAF     | PA  | 21    | 0.74 | 0.57 | 0.56 | 0.65 | 0.57 | 0.53 | 0.93 |
| CAF     | PL  | 22    | 1.00 | 0.39 | 0.65 | 0.49 | 0.55 | 0.60 | 1.00 |
| CAF     | PA  | 23    | 0.95 | 0.37 | 0.70 | 0.50 | 1.00 | 0.66 | 0.93 |
| CAF     | PA  | 24    | 0.88 | 0.62 | 0.64 | 0.63 | 0.40 | 0.56 | 0.86 |
| CAF     | PL  | 25    | 0.60 | 0.41 | 0.42 | 0.38 | 0.24 | 0.33 | 0.67 |
| CAF     | PA  | 26    | 0.93 | 0.18 | 0.46 | 0.27 | 0.75 | 0.43 | 1.00 |
| CAF     | PL  | 27    | 0.53 | 0.43 | 0.42 | 0.40 | 0.11 | 0.41 | 0.78 |

Posteriormente se multiplica el valor reducido de cada variable (entre el rango 0.1 y 1.0) por la contribución de cada variable a la formación de los factores 1 y 2 (Tablas 16 y 17). Los signos (+ y -) se asignan de acuerdo a la posición de cada variable en el plano factorial (figura 55). Las contribuciones fueron:

|    | Ma    | Mi   | PT   | H°   | Kh    | Da    | RTc   |
|----|-------|------|------|------|-------|-------|-------|
| F1 | 1116  | 439  | 2536 | 1961 | 426   | -2506 | -1017 |
| F2 | -1688 | 2855 | 207  | 663  | -2767 | -224  | 1596  |

**Tabla 16. Multiplicación de cada variable reducida por su contribución al Factor 1.**

| Ventana | Uso | Finca | Ma      | Mi     | PT      | H°      | Kh     | Da       | RTc      |
|---------|-----|-------|---------|--------|---------|---------|--------|----------|----------|
| CTR     | PL  | 1     | 280.91  | 253.78 | 1019.24 | 812.08  | 66.38  | -937.87  | -517.14  |
| CTR     | PL  | 2     | 450.22  | 275.89 | 1417.86 | 833.65  | 60.44  | -1266.98 | -418.70  |
| CTR     | PAD | 3     | 150.71  | 333.54 | 1104.84 | 879.99  | 79.57  | -1073.39 | -565.81  |
| CTR     | PL  | 4     | 111.60  | 395.36 | 1510.72 | 1196.36 | 42.60  | -1547.70 | -652.31  |
| CTR     | PL  | 5     | 1070.69 | 228.20 | 1432.07 | 1154.83 | 92.24  | -1392.82 | -319.57  |
| CTR     | PL  | 6     | 1050.18 | 439.00 | 2536.00 | 1893.09 | 60.44  | -2506.00 | -964.90  |
| CTR     | PL  | 7     | 531.77  | 219.51 | 908.06  | 1018.56 | 60.44  | -957.23  | -346.83  |
| CTR     | PL  | 8     | 449.74  | 307.15 | 1089.36 | 766.89  | 123.78 | -966.91  | -408.16  |
| CTR     | PLN | 9     | 351.02  | 47.72  | 253.60  | 196.10  | 88.62  | -415.16  | -577.04  |
| CSP     | PL  | 10    | 474.06  | 127.37 | 527.13  | 295.44  | 48.55  | -250.60  | -398.97  |
| CSP     | RV  | 11    | 654.82  | 247.30 | 1917.23 | 1961.00 | 70.26  | -1634.82 | -671.35  |
| CSP     | PA  | 12    | 597.11  | 237.46 | 763.08  | 802.91  | 91.98  | -724.91  | -812.61  |
| CSP     | RV  | 13    | 785.97  | 43.90  | 1428.91 | 977.26  | 86.55  | -1199.22 | -738.77  |
| CSP     | PAD | 14    | 679.14  | 239.66 | 1049.25 | 513.15  | 58.37  | -947.55  | -385.65  |
| CSP     | PAD | 15    | 311.91  | 290.82 | 1049.57 | 465.21  | 89.65  | -976.59  | -101.70  |
| CSP     | PL  | 16    | 446.40  | 314.09 | 1279.83 | 853.15  | 51.91  | -1170.18 | -472.15  |
| CSP     | PLN | 17    | 414.45  | 335.74 | 1553.99 | 1160.57 | 81.38  | -1228.26 | -476.24  |
| CSP     | PL  | 18    | 515.08  | 312.59 | 1423.23 | 1010.07 | 162.04 | -1276.66 | -660.16  |
| CAF     | PA  | 19    | 870.38  | 270.22 | 1140.53 | 910.27  | 242.19 | -1024.99 | -906.63  |
| CAF     | PA  | 20    | 510.31  | 219.05 | 1221.39 | 531.97  | 176.26 | -1296.02 | -973.03  |
| CAF     | PA  | 21    | 821.74  | 250.31 | 1428.91 | 1279.63 | 244.25 | -1325.06 | -948.52  |
| CAF     | PL  | 22    | 1116.00 | 169.85 | 1637.70 | 962.58  | 235.20 | -1508.98 | -1017.00 |
| CAF     | PA  | 23    | 1063.06 | 163.48 | 1786.15 | 978.41  | 426.00 | -1644.50 | -946.88  |
| CAF     | PA  | 24    | 983.42  | 272.65 | 1614.32 | 1233.52 | 168.76 | -1402.50 | -873.98  |
| CAF     | PL  | 25    | 671.51  | 181.31 | 1052.72 | 738.67  | 103.10 | -831.39  | -685.98  |
| CAF     | PA  | 26    | 1035.40 | 80.48  | 1159.80 | 525.54  | 321.55 | -1073.39 | -1015.32 |
| CAF     | PL  | 27    | 587.09  | 189.88 | 1055.88 | 790.98  | 47.00  | -1015.31 | -790.18  |

|    |      |     |      |      |     |       |       |
|----|------|-----|------|------|-----|-------|-------|
| F1 | 1116 | 439 | 2536 | 1961 | 426 | -2506 | -1017 |
|----|------|-----|------|------|-----|-------|-------|

**Tabla 17. Multiplicación de cada variable reducida por su contribución al Factor 2.**

| Ventana | Uso | Finca | Ma       | Mi      | PT     | H°     | Kh       | Da      | RTc     |
|---------|-----|-------|----------|---------|--------|--------|----------|---------|---------|
| CTR     | PL  | 1     | -424.89  | 1650.43 | 83.20  | 274.56 | -431.19  | -83.83  | 811.56  |
| CTR     | PL  | 2     | -680.97  | 1794.22 | 115.73 | 281.85 | -392.57  | -113.25 | 657.08  |
| CTR     | PAD | 3     | -227.95  | 2169.15 | 90.18  | 297.52 | -516.83  | -95.95  | 887.93  |
| CTR     | PL  | 4     | -168.80  | 2571.17 | 123.31 | 404.48 | -276.70  | -138.34 | 1023.68 |
| CTR     | PL  | 5     | -1619.47 | 1484.05 | 116.89 | 390.44 | -599.11  | -124.50 | 501.51  |
| CTR     | PL  | 6     | -1588.45 | 2855.00 | 207.00 | 640.04 | -392.57  | -224.00 | 1514.24 |
| CTR     | PL  | 7     | -804.32  | 1427.58 | 74.12  | 344.37 | -392.57  | -85.56  | 544.29  |
| CTR     | PL  | 8     | -680.25  | 1997.50 | 88.92  | 259.28 | -803.98  | -86.43  | 640.54  |
| CTR     | PLN | 9     | -530.93  | 310.34  | 20.70  | 66.30  | -575.60  | -37.11  | 905.57  |
| CSP     | PL  | 10    | -717.04  | 828.31  | 43.03  | 99.89  | -315.32  | -22.40  | 626.11  |
| CSP     | RV  | 11    | -990.44  | 1608.27 | 156.49 | 663.00 | -456.38  | -146.13 | 1053.57 |
| CSP     | PA  | 12    | -903.15  | 1544.28 | 62.29  | 271.46 | -597.43  | -64.80  | 1275.25 |
| CSP     | RV  | 13    | -1188.81 | 285.50  | 116.63 | 330.41 | -562.17  | -107.19 | 1159.37 |
| CSP     | PAD | 14    | -1027.23 | 1558.58 | 85.64  | 173.49 | -379.13  | -84.70  | 605.20  |
| CSP     | PAD | 15    | -471.77  | 1891.34 | 85.67  | 157.28 | -582.32  | -87.29  | 159.60  |
| CSP     | PL  | 16    | -675.20  | 2042.67 | 104.47 | 288.44 | -337.15  | -104.60 | 740.96  |
| CSP     | PLN | 17    | -626.87  | 2183.45 | 126.84 | 392.38 | -528.58  | -109.79 | 747.37  |
| CSP     | PL  | 18    | -779.08  | 2032.88 | 116.17 | 341.50 | -1052.50 | -114.12 | 1036.00 |
| CAF     | PA  | 19    | -1316.50 | 1757.33 | 93.10  | 307.76 | -1573.07 | -91.62  | 1422.80 |
| CAF     | PA  | 20    | -771.86  | 1424.57 | 99.70  | 179.85 | -1144.86 | -115.85 | 1527.00 |
| CAF     | PA  | 21    | -1242.92 | 1627.84 | 116.63 | 432.63 | -1586.50 | -118.44 | 1488.53 |
| CAF     | PL  | 22    | -1688.00 | 1104.61 | 133.68 | 325.44 | -1527.73 | -134.88 | 1596.00 |
| CAF     | PA  | 23    | -1607.93 | 1063.20 | 145.79 | 330.79 | -2767.00 | -146.99 | 1485.96 |
| CAF     | PA  | 24    | -1487.46 | 1773.14 | 131.77 | 417.04 | -1096.16 | -125.36 | 1371.56 |
| CAF     | PL  | 25    | -1015.69 | 1179.14 | 85.93  | 249.74 | -669.64  | -74.31  | 1076.52 |
| CAF     | PA  | 26    | -1566.09 | 523.40  | 94.67  | 177.68 | -2088.59 | -95.95  | 1593.37 |
| CAF     | PL  | 27    | -888.00  | 1234.85 | 86.19  | 267.42 | -305.25  | -90.75  | 1240.04 |

|           |       |      |     |     |       |      |      |
|-----------|-------|------|-----|-----|-------|------|------|
| <b>F2</b> | -1688 | 2855 | 207 | 663 | -2767 | -224 | 1596 |
|-----------|-------|------|-----|-----|-------|------|------|

Finalmente se suman los valores de las variables multiplicadas por su aporte a los factores 1 y 2 posteriormente, este valor se reduce nuevamente con la fórmula de transformación homotética 1. De esta manera se obtiene el valor del Indicador para cada sitio. (Tablas18 - 19).

**Tabla 18. Suma de los valores de las variables multiplicadas por su aporte a los factores 1 y 2.**

| Ventana | Uso | Finca | Ma      | Mi      | PT      | H°      | Kh       | Da       | RTc    | Suma    | Reducción Indicador |
|---------|-----|-------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|--------|---------|---------------------|
| CTR     | PL  | 1     | -143.98 | 1904.21 | 1102.44 | 1086.64 | -364.80  | -1021.70 | 294.42 | 2857.23 | 0.6                 |
| CTR     | PL  | 2     | -230.76 | 2070.11 | 1533.59 | 1115.50 | -332.13  | -1380.23 | 238.38 | 3014.46 | 0.6                 |
| CTR     | PAD | 3     | -77.24  | 2502.69 | 1195.02 | 1177.51 | -437.26  | -1169.33 | 322.13 | 3513.51 | 0.7                 |
| CTR     | PL  | 4     | -57.20  | 2966.53 | 1634.03 | 1600.83 | -234.10  | -1686.04 | 371.37 | 4595.43 | 0.9                 |
| CTR     | PL  | 5     | -548.78 | 1712.24 | 1548.96 | 1545.27 | -506.87  | -1517.32 | 181.94 | 2415.45 | 0.5                 |
| CTR     | PL  | 6     | -538.27 | 3294.00 | 2743.00 | 2533.13 | -332.13  | -2730.00 | 549.34 | 5519.08 | 1.0                 |
| CTR     | PL  | 7     | -272.56 | 1647.10 | 982.18  | 1362.92 | -332.13  | -1042.79 | 197.46 | 2542.19 | 0.5                 |
| CTR     | PL  | 8     | -230.51 | 2304.64 | 1178.28 | 1026.17 | -680.20  | -1053.33 | 232.38 | 2777.42 | 0.6                 |
| CTR     | PLN | 9     | -179.91 | 358.06  | 274.30  | 262.40  | -486.98  | -452.27  | 328.52 | 104.13  | 0.2                 |
| CSP     | PL  | 10    | -242.98 | 955.68  | 570.16  | 395.32  | -266.78  | -273.00  | 227.14 | 1365.55 | 0.4                 |
| CSP     | RV  | 11    | -335.62 | 1855.57 | 2073.72 | 2624.00 | -386.12  | -1780.94 | 382.21 | 4432.82 | 0.8                 |
| CSP     | PA  | 12    | -306.04 | 1781.73 | 825.37  | 1074.36 | -505.45  | -789.71  | 462.64 | 2542.89 | 0.5                 |
| CSP     | RV  | 13    | -402.84 | 329.40  | 1545.55 | 1307.67 | -475.62  | -1306.42 | 420.60 | 1418.34 | 0.4                 |
| CSP     | PAD | 14    | -348.09 | 1798.24 | 1134.89 | 686.65  | -320.76  | -1032.24 | 219.56 | 2138.24 | 0.5                 |
| CSP     | PAD | 15    | -159.87 | 2182.17 | 1135.24 | 622.49  | -492.67  | -1063.88 | 57.90  | 2281.38 | 0.5                 |
| CSP     | PL  | 16    | -228.80 | 2356.76 | 1384.29 | 1141.59 | -285.25  | -1274.78 | 268.81 | 3362.62 | 0.7                 |
| CSP     | PLN | 17    | -212.42 | 2519.19 | 1680.84 | 1552.95 | -447.21  | -1338.05 | 271.13 | 4026.43 | 0.8                 |
| CSP     | PL  | 18    | -264.00 | 2345.47 | 1539.40 | 1351.57 | -890.46  | -1390.78 | 375.84 | 3067.03 | 0.6                 |
| CAF     | PA  | 19    | -446.11 | 2027.55 | 1233.63 | 1218.03 | -1330.88 | -1116.61 | 516.17 | 2101.78 | 0.5                 |
| CAF     | PA  | 20    | -261.56 | 1643.62 | 1321.09 | 711.82  | -968.60  | -1411.87 | 553.97 | 1588.47 | 0.4                 |
| CAF     | PA  | 21    | -421.18 | 1878.15 | 1545.55 | 1712.27 | -1342.25 | -1443.50 | 540.01 | 2469.05 | 0.5                 |
| CAF     | PL  | 22    | -572.00 | 1274.46 | 1771.37 | 1288.02 | -1292.52 | -1643.86 | 579.00 | 1404.47 | 0.4                 |
| CAF     | PA  | 23    | -544.87 | 1226.68 | 1931.94 | 1309.20 | -2341.00 | -1791.49 | 539.08 | 329.56  | 0.2                 |
| CAF     | PA  | 24    | -504.04 | 2045.79 | 1746.09 | 1650.57 | -927.40  | -1527.86 | 497.58 | 2980.72 | 0.6                 |
| CAF     | PL  | 25    | -344.18 | 1360.45 | 1138.65 | 988.41  | -566.54  | -905.70  | 390.54 | 2061.63 | 0.5                 |
| CAF     | PA  | 26    | -530.69 | 603.88  | 1254.47 | 703.22  | -1767.04 | -1169.33 | 578.05 | -327.43 | 0.1                 |
| CAF     | PL  | 27    | -300.91 | 1424.73 | 1142.07 | 1058.40 | -258.25  | -1106.06 | 449.86 | 2409.84 | 0.5                 |

|   |        |
|---|--------|
| a | 5519.1 |
| b | -327.4 |

Tabla 19. Indicadores de calidad del por etapas (1-A, 1-B, 2-A y 2-B).

| Sistema | Uso | Finca | Indicador |
|---------|-----|-------|-----------|
| CTR     | PL  | 1     | 0.6       |
| CTR     | PL  | 1     | 0.7       |
| CTR     | PL  | 1     | 0.5       |
| CTR     | PL  | 1     | 0.7       |
| CTR     | PL  | 1     | 0.6       |
| CTR     | PL  | 2     | 0.4       |
| CTR     | PL  | 2     | 0.3       |
| CTR     | PL  | 2     | 0.4       |
| CTR     | PL  | 2     | 0.6       |
| CTR     | PL  | 2     | 0.6       |
| CTR     | PL  | 3     | 0.7       |
| CTR     | PL  | 3     | 0.8       |
| CTR     | PAD | 3     | 0.6       |
| CTR     | PL  | 3     | 0.8       |
| CTR     | PL  | 3     | 0.9       |
| CTR     | PL  | 4     | 0.8       |
| CTR     | PL  | 4     | 0.9       |
| CTR     | PL  | 4     | 0.9       |
| CTR     | PL  | 4     | 0.6       |
| CTR     | PL  | 4     | 0.6       |
| CTR     | PL  | 5     | 0.4       |
| CTR     | PL  | 5     | 0.6       |
| CTR     | PL  | 5     | 0.4       |
| CTR     | PL  | 5     | 0.7       |
| CTR     | PL  | 5     | 0.7       |
| CTR     | PL  | 6     | 1.0       |
| CTR     | PL  | 6     | 1.0       |
| CTR     | PL  | 6     | 1.0       |
| CTR     | PL  | 6     | 0.9       |
| CTR     | PL  | 6     | 0.5       |
| CTR     | PL  | 7     | 0.5       |
| CTR     | PL  | 7     | 0.7       |
| CTR     | PL  | 7     | 0.6       |
| CTR     | PL  | 7     | 0.6       |
| CTR     | PL  | 7     | 0.6       |
| CTR     | PL  | 8     | 0.8       |
| CTR     | PL  | 8     | 0.8       |
| CTR     | PL  | 8     | 0.7       |
| CTR     | PL  | 8     | 0.8       |
| CTR     | PL  | 8     | 0.6       |
| CTR     | PLN | 9     | 0.7       |
| CTR     | PAD | 9     | 0.7       |
| CTR     | PLN | 9     | 0.9       |
| CTR     | PL  | 9     | 0.5       |
| CTR     | RV  | 9     | 0.6       |

|     |     |    |     |
|-----|-----|----|-----|
| CSP | PA  | 10 | 0.1 |
| CSP | PL  | 10 | 0.4 |
| CSP | PL  | 10 | 0.5 |
| CSP | RJ  | 10 | 0.5 |
| CSP | RV  | 10 | 0.4 |
| CSP | PL  | 11 | 0.7 |
| CSP | PLN | 11 | 0.7 |
| CSP | RV  | 11 | 0.5 |
| CSP | PL  | 11 | 0.2 |
| CSP | RJ  | 11 | 0.7 |
| CSP | PA  | 12 | 0.5 |
| CSP | PA  | 12 | 0.3 |
| CSP | PA  | 12 | 0.3 |
| CSP | PL  | 12 | 0.6 |
| CSP | PLN | 12 | 0.3 |
| CSP | PL  | 13 | 0.5 |
| CSP | PAD | 13 | 0.7 |
| CSP | RV  | 13 | 0.6 |
| CSP | PA  | 13 | 0.2 |
| CSP | PA  | 13 | 0.7 |
| CSP | RV  | 14 | 0.6 |
| CSP | RV  | 14 | 0.5 |
| CSP | PAD | 14 | 0.7 |
| CSP | PA  | 14 | 0.5 |
| CSP | PL  | 14 | 0.6 |
| CSP | PA  | 15 | 0.2 |
| CSP | PA  | 15 | 0.6 |
| CSP | PAD | 15 | 0.6 |
| CSP | PAD | 15 | 0.7 |
| CSP | PAD | 15 | 0.1 |
| CSP | PL  | 16 | 0.9 |
| CSP | PL  | 16 | 0.8 |
| CSP | PL  | 16 | 0.8 |
| CSP | PL  | 16 | 0.6 |
| CSP | PL  | 16 | 0.6 |
| CSP | RV  | 17 | 0.5 |
| CSP | RV  | 17 | 0.7 |
| CSP | PLN | 17 | 0.6 |
| CSP | PA  | 17 | 0.2 |
| CSP | PAD | 17 | 0.3 |
| CSP | PL  | 18 | 0.8 |
| CSP | PL  | 18 | 0.8 |
| CSP | PL  | 18 | 0.9 |
| CSP | PL  | 18 | 0.7 |
| CSP | PL  | 18 | 0.8 |

|     |     |    |     |
|-----|-----|----|-----|
| CAF | PLN | 19 | 0.8 |
| CAF | RV  | 19 | 0.5 |
| CAF | PA  | 19 | 0.8 |
| CAF | RV  | 19 | 0.7 |
| CAF | PA  | 19 | 0.7 |
| CAF | PA  | 20 | 0.6 |
| CAF | PA  | 20 | 0.4 |
| CAF | PA  | 20 | 0.6 |
| CAF | PA  | 20 | 0.6 |
| CAF | RJ  | 20 | 0.5 |
| CAF | RV  | 21 | 0.5 |
| CAF | PLN | 21 | 0.8 |
| CAF | PA  | 21 | 0.8 |
| CAF | RV  | 21 | 0.5 |
| CAF | PA  | 21 | 0.9 |
| CAF | PL  | 22 | 0.9 |
| CAF | PAD | 22 | 0.8 |
| CAF | PL  | 22 | 0.9 |
| CAF | PA  | 22 | 0.8 |
| CAF | PLN | 22 | 0.9 |
| CAF | PL  | 23 | 0.8 |
| CAF | PAD | 23 | 0.8 |
| CAF | PA  | 23 | 0.4 |
| CAF | PA  | 23 | 0.4 |
| CAF | PA  | 23 | 0.8 |
| CAF | PA  | 24 | 0.2 |
| CAF | RV  | 24 | 0.3 |
| CAF | PA  | 24 | 0.8 |
| CAF | RV  | 24 | 0.6 |
| CAF | RJ  | 24 | 0.4 |
| CAF | PL  | 25 | 0.5 |
| CAF | RV  | 25 | 0.4 |
| CAF | PL  | 25 | 0.4 |
| CAF | PA  | 25 | 0.2 |
| CAF | PA  | 25 | 0.4 |
| CAF | PAD | 26 | 0.5 |
| CAF | PA  | 26 | 0.2 |
| CAF | PA  | 26 | 0.5 |
| CAF | PAD | 26 | 0.9 |
| CAF | PLN | 26 | 0.5 |
| CAF | PL  | 27 | 0.7 |
| CAF | PL  | 27 | 0.7 |
| CAF | PL  | 27 | 0.8 |
| CAF | PL  | 27 | 0.7 |
| CAF | PL  | 27 | 0.9 |

**ETAPA 1-A**

CTR: Tradicional, CSP: Silvopastoral, CAF: Agroforestal; PL: pastura limpia, PAD: pastura con árboles dispersos, PLN: pastura con leñosas RV: barbecho viejo, PA: sistema agroforestal.

| Sistema | Uso | Finca | Indicador |
|---------|-----|-------|-----------|
| CTR     | PL  | 1     | 0.5       |
| CTR     | PL  | 2     | 0.4       |
| CTR     | PAD | 3     | 0.6       |
| CTR     | PL  | 4     | 0.9       |
| CTR     | PL  | 5     | 0.4       |
| CTR     | PL  | 6     | 1.0       |
| CTR     | PL  | 7     | 0.6       |
| CTR     | PL  | 8     | 0.7       |
| CTR     | PLN | 9     | 0.9       |
| CSP     | PL  | 10    | 0.5       |
| CSP     | RV  | 11    | 0.5       |
| CSP     | PA  | 12    | 0.3       |
| CSP     | RV  | 13    | 0.6       |
| CSP     | PAD | 14    | 0.7       |
| CSP     | PAD | 15    | 0.6       |
| CSP     | PL  | 16    | 0.8       |
| CSP     | PLN | 17    | 0.6       |
| CSP     | PL  | 18    | 0.9       |
| CAF     | PA  | 19    | 0.8       |
| CAF     | PA  | 20    | 0.6       |
| CAF     | PA  | 21    | 0.8       |
| CAF     | PL  | 22    | 0.9       |
| CAF     | PA  | 23    | 0.4       |
| CAF     | PA  | 24    | 0.8       |
| CAF     | PL  | 25    | 0.4       |
| CAF     | PA  | 26    | 0.5       |
| CAF     | PL  | 27    | 0.8       |

**ETAPA 1-B**

| Sistema | Uso | Finca | Indicador |
|---------|-----|-------|-----------|
| CTR     | PL  | 1     | 0.5       |
| CTR     | PL  | 2     | 0.5       |
| CTR     | PAD | 3     | 0.7       |
| CTR     | PL  | 4     | 0.8       |
| CTR     | PL  | 5     | 0.4       |
| CTR     | PL  | 6     | 1.0       |
| CTR     | PL  | 7     | 0.3       |
| CTR     | PL  | 8     | 0.4       |
| CTR     | PLN | 9     | 0.2       |
| CSP     | PL  | 10    | 0.2       |
| CSP     | RV  | 11    | 0.7       |
| CSP     | PA  | 12    | 0.4       |
| CSP     | RV  | 13    | 0.1       |
| CSP     | PAD | 14    | 0.4       |
| CSP     | PAD | 15    | 0.5       |
| CSP     | PL  | 16    | 0.6       |
| CSP     | PLN | 17    | 0.6       |
| CSP     | PL  | 18    | 0.7       |
| CAF     | PA  | 19    | 0.6       |
| CAF     | PA  | 20    | 0.4       |
| CAF     | PA  | 21    | 0.5       |
| CAF     | PL  | 22    | 0.3       |
| CAF     | PA  | 23    | 0.3       |
| CAF     | PA  | 24    | 0.3       |
| CAF     | PL  | 25    | 0.3       |
| CAF     | PA  | 26    | 0.2       |
| CAF     | PL  | 27    | 0.4       |

**ETAPA 2-A**

| Sistema | Uso | Finca | Indicador |
|---------|-----|-------|-----------|
| CAF     | PL  | 1     | 0.6       |
| CAF     | PA  | 2     | 0.1       |
| CAF     | PA  | 3     | 0.5       |
| CAF     | PA  | 4     | 0.7       |
| CAF     | PA  | 5     | 0.6       |
| CAF     | PA  | 6     | 0.7       |
| CTR     | PL  | 7     | 0.8       |
| CAF     | PA  | 8     | 0.5       |
| CSP     | PA  | 9     | 0.6       |
| CAF     | PL  | 10    | 0.3       |
| CAF     | PL  | 11    | 0.3       |
| CTR     | PL  | 12    | 0.8       |
| CSP     | RV  | 13    | 1.0       |
| CSP     | RV  | 14    | 0.7       |
| CTR     | PAD | 15    | 0.7       |
| CTR     | PLN | 16    | 0.2       |
| CSP     | PL  | 17    | 0.5       |
| CSP     | PAD | 18    | 0.7       |
| CTR     | PL  | 19    | 0.7       |
| CTR     | PL  | 20    | 0.8       |
| CSP     | PL  | 21    | 0.6       |
| CTR     | PL  | 22    | 0.8       |
| CSP     | PL  | 23    | 0.9       |
| CTR     | PL  | 24    | 0.5       |
| CTR     | PL  | 25    | 0.5       |
| CSP     | PLN | 26    | 0.8       |
| CSP     | PAD | 27    | 0.6       |

**ETAPA 2-B**

CTR: Tradicional, CSP: Silvopastoril, CAF: Agroforestal; PL: pastura limpia, PAD: pastura con árboles dispersos, PLN: pastura con leñosas RV: barbecho viejo, PA: sistema agroforestal.

Posteriormente, se realizó un análisis de correlación entre las etapas evaluadas, obteniendo los siguientes resultados:

**Correlación Etapa 1 (A y B): 0.99**

**Correlación Etapa 2 (A y B): 0.96**

Lo anterior muestra que hay una estrecha correlación entre las etapas de análisis y que es posible obtener indicadores sintéticos robustos con un menor número de determinaciones en campo. Para el caso de la etapa 1-B con 27 unidades de muestreo es suficiente para obtener resultados confiables acerca de la influencia de las propiedades físicas del suelo en la dinámica hídrica y en el caso de la

etapa 2-B con 27 puntos es posible entender la dinámica del suelo a profundidad de 0-10 cm de manera confiable.

## 6. Discusión

La degradación de los suelos puede ser considerada como la pérdida de su aptitud física, biológica y química que le restan potencial para proveer servicios ecosistémicos de calidad. El uso intensivo del recurso suelo, sumado a un conflicto entre su vocación y uso actual están generando cambios intensos en la estabilidad del recurso como soporte para la vida.

El Departamento de Ciénega, Piedemonte Amazónico Colombiano, no es ajeno a esta dinámica de producción sin criterios sostenibles ni de conservación. Hace muchos años inició en esta región de Colombia un proceso de colonización que intervino la selva amazónica en busca de mejores áreas para el establecimiento de sistemas ganaderos y agrícolas extensivos, lo que trajo consigo una pérdida del potencial productivo de las tierras y por ende, un agotamiento de las reservas hídricas del suelo. En este Departamento es común la explotación del suelo sustentado en tres sistemas ancestrales: Sistema Tradicional, Sistema Agroforestal y Sistema Silvopastoril y en cada sistema se identifican diversos usos. Cada uno de ellos tiene su pro y su contra, pero en definitiva, hay usos que atentan contra la calidad del suelo y su potencial para proveer servicios hídricos de calidad.

El objeto de este estudio fue evaluar los usos del suelo predominantes en esta región del País y aproximarse a la construcción de un indicador hídrico de calidad para evaluar cómo los sistemas de uso afectan de manera directa o indirecta las propiedades físicas de estos suelos, en especial, aquellas que tienen importancia desde el punto de vista hídrico.

De acuerdo con **Velásquez (2004)**, es por tanto indispensable desarrollar una mayor conciencia sobre todos los recursos que se pierden en los actuales sistemas de manejo y proporcionar a los diversos sectores interesados, las herramientas y metodologías para evaluar y valorar los servicios y bienes de los ecosistemas.

En los últimos años se han venido implementando diferentes metodologías que logran cada vez mayores argumentos científicos y que consisten en la construcción de indicadores locales de calidad del suelo. Existen un sinnúmero de trabajos que aportan criterios técnicos para avanzar en la generación de indicadores cada vez más exactos (**Lal, 1994; Cruz et al, 2004; Ballesta y González Quiñones, 2006**).

Actualmente, los diferentes tipos de uso del suelo producen un efecto sobre la calidad de este a nivel de parcela y paisaje, los cuales se pueden medir a través de diferentes métodos (**Klemens et al., 2003; Ruiz-Camacho, 2004; Mitchell et al., 2000; Herrick et al., 2002; Velásquez et al., 2007., Grimaldi et al., 2014., Lavelle et al., 2014. Martínez, 2006**).

Los resultados de la presente investigación posibilitaron el análisis de diferentes ventanas paisajísticas y usos del suelo en el piedemonte amazónico, con el fin de construir un indicador hídrico potencial que aporte elementos y criterios de manejo y uso sostenible del recurso, manteniendo y conservando su potencial productivo y su capacidad para proveer servicios ecosistémicos. Los análisis de componentes principales efectuados mostraron que los diferentes grupos de variables físicas determinadas separan en forma significativa los diferentes usos del suelo, las ventanas paisajísticas y la profundidad en función de su calidad hídrica.

Esta separación posibilitó identificar que el sistema agroforestal (CAF) y el sistema silvopastoril (SSP) representan mejores alternativas de uso del suelo que el sistema tradicional (CTR) en estos ecosistemas del piedemonte amazónico. En cuanto al sistema agroforestal se manejan diversos estratos de vegetación y se

posibilitan procesos paulatinos de regeneración natural que le brindan al suelo una condición especial, con contenidos de humedad adecuados y con valores medios altos de porosidad, humedad, macroporosidad, microporosidad y conductividad hidráulica. Por su parte, en el sistema silvopastoril se combina el uso de pasturas de alto valor proteico con especies arbóreas de porte bajo y el establecimiento de sistemas ganaderos, que conllevan a una degradación del recurso desde sus propiedades físicas, en especial: la densidad aparente, la porosidad total, la microporosidad, la resistencia tangencial al corte y la resistencia vertical a la penetración, indicando que estos suelos ya han iniciado un proceso de compactación. Finalmente, el sistema tradicional es utilizado por los agricultores de la zona para el establecimiento de sistemas agrícolas y ganaderos extensivos que no conservan los parámetros de protección y manejo adecuado del suelo, generando en él, un proceso más acelerado hacia su degradación física<sup>29</sup>.

En todos los sistemas de manejo del suelo evaluados se observó que el uso Pasto Limpio PL está influenciando fuertemente las propiedades físicas evaluadas. Este uso se presenta en los tres sistemas: Tradicional. Silvopastoril y Agroforestal, presentando variaciones entre los tipos de pasturas asociadas al uso y el tiempo de establecimiento de las mismas. Los pastizales al tener mayor presencia de gramíneas, favorecen la presencia de lombrices de tierra que producen agregados biogénicos y esto aumenta el valor de algunas variables como la porosidad y la humedad que está sujeta a esta, también influyen en la disminución de la Da. Dependiendo del paisaje donde se encuentre establecido,

---

<sup>29</sup> La degradación de los suelos ha sido definida como un descenso en la habilidad del suelo para cumplir sus funciones como medio para el crecimiento de las plantas, como regulador del régimen hídrico, y como filtro ambiental, debido a causas naturales y antropogénicas. La degradación de suelos y recursos hídricos es el principal factor que atenta contra la sostenibilidad de la utilización agrícola de las tierras en todo el mundo, lo que conduce a crecientes dificultades para producir los requerimientos de alimentos y fibras para su creciente población. Como efectos indirectos de la degradación de suelos y agua, se presentan riesgos crecientes de desastres naturales (inundaciones, sedimentaciones, deslizamientos, etc.), con características a veces catastróficas, así como disminución de la biodiversidad, deterioro de la suplencia de agua en cantidad y calidad, y efectos en los cambios climáticos globales y sus consecuencias (Pla, 2010).

el pasto limpio PL puede aportar condiciones adecuadas para la regulación hídrica (por ejemplo cuando se encuentra asociado a sistemas agroforestales), así mismo, puede propiciar condiciones no deseables (por ejemplo asociado a sistemas silvopastoriles, barbecho viejo, pasturas con leñosas, etc). El pasto limpio PL al ser el sistema de uso del suelo más común en la zonas, tiene mayor representatividad y es por eso que tiene valores del indicador que van desde 0.2 hasta 1.0.

En la Etapa 1-A se observa en el sistema Agroforestal valores poco dispersos, con algunos datos extremos por fuera de la media. En el sistema Tradicional se observan valores más dispersos con algunos datos extremos que están por fuera de la media, mientras que en el sistema Silvopastoril se observan los datos más dispersos. En todos los casos el uso PL tanto en el sistema tradicional, agroforestal y silvopastoril está marcando una tendencia extrema. Las propiedades que más influyen en este comportamiento son la porosidad total, humedad, densidad aparente y resistencia tangencial al corte. En el sistema tradicional se encuentra pasto nativo con caucho de un año y pasturas degradadas que pueden influenciar la resistencia del suelo a la ruptura y da un indicio del grado de compactación debido a una densidad aparente alta. También se encuentra en esta zona de muestreo un humedal y una zona protectora del mismo, lo cual explica los niveles altos de porosidad total y humedad registrados.

En el caso del sistema agroforestal se presentaron valores altos en el uso PL donde las propiedades físicas más influyentes fueron la  $D_a$ , RVP, PT,  $H^\circ$ . La presencia de diferentes tipos de pasturas: Pasto imperial (*Axonopus scoparius*), *Brachiaria brizantha* (*Brachiaria brizantha* c.v.), *Brachiaria mulato* (*Brachiaria híbrido* cv. *Mulato II*) y grama nativa (*Cynodon dactylon*), producen un efecto de difícil penetración en el suelo debido a que los estolones de las gramíneas se cierran impidiendo una buena penetración en el suelo de los implementos de arado. Los contenidos de

humedad diferenciales se explican por la presencia de una quebrada cerca de la zona de muestreo, que influye en el aumento del nivel freático.

En la Etapa 1-B, el sistema Silvopastoril presenta valores homogéneos, mientras que los sistemas tradicionales y agroforestales tienen valores más dispersos con algunos datos extremos que se presentan en los usos PL (CTR) y PA (CAF).

En el sistema tradicional el uso de PL está determinando unos valores extremos en propiedades como: RTc, RVP, H°. Se presentan potreros con grama nativa (*Cynodon dactylon*) y pasto *Brachiaria (Brachiaria Decumbens)* influenciados por un humedal cercano a los sitios de muestreo con presencia de algunas palmas y árboles dispersos. Los valores altos de RTc y RVP se explican por el estado de los potreros con grama nativa vieja asociado a la presencia de árboles dispersos cuyas raíces pueden afectar las mediciones. Las determinaciones cercanas a la zona de influencia del humedal determinan los valores altos de humedad.

En el sistema agroforestal el uso PA tuvo valores extremos influenciados por la presencia de barbechos de más de 8 años, con potreros enrastrados y algunos árboles de caucho (*Ficus elástica Roxb*), afectando los valores de algunas propiedades físicas evaluadas. Estos suelos presentan altos contenidos de arcilla y valores altos de humedad y porosidad. Los altos contenidos de humedad se explican por la altura que ha alcanzado el dosel arbóreo que permite un microclima húmedo debido a la sombra que las especies más altas proporcionan.

En la Etapa 2-A, la variable profundidad presenta alto nivel de dispersión e impacto sobre las propiedades físicas evaluadas. Los valores más extremos se presentan en la profundidad de 0-10 cm, mientras los menos dispersos en la profundidad de 20-40 cm. En los primeros 10 cm se presenta alta dispersión en

los datos en el sistema CTR Y CAF. En el rango de 10-15 cm se presenta dispersión alta en los datos de CAF y en la profundidad de 20-40 cm se presenta alta dispersión en los datos de CTR y CAF.

Los usos de PL y RV son los que presentan los datos extremos más dispersos en todos los sistemas de uso. Por su parte, las propiedades físicas más influenciadas por la variable profundidad son: Da, PT, H°, Ma, Mi y Kh.

La Da presenta valores extremos en las tres profundidades analizadas y en especial en el sistema CAF bajo el uso PL, presentando los valores más altos en profundidades de 10-15 cm y 20-40 cm. Por su parte la PT y la H° se ven afectadas en todas las profundidades. La PT presenta los valores más bajos en el sistema silvopastoril en todas las profundidades, mientras que los valores más altos de PT se presentaron en el sistema tradicional en la profundidad de 0-10 cm.

En cuanto la H° los valores más altos se presentan en el uso CTR en las tres profundidades, mientras que los valores más bajos se reportaron en el sistema silvopastoril. Por su parte, la Ma y Mi tuvieron un comportamiento similar y se vieron fuertemente influenciadas por el uso PL en los sistemas CSP y CTR. La Ma presenta un valor alto en la profundidad de 20-40 cm en el sistema CAF y el valor más bajo en el sistema CTR. Por su parte, la Mi presenta valores más altos en la profundidad de 0-10 cm en el sistema CTR., debido a las prácticas de preparación del suelo con implementos de arado como el azadón. La Kh tuvo variación en todas las profundidades de análisis y se vio fuertemente influenciada por el uso PL en los sistemas CAF, CTR y CSP.

En la etapa 2 – B no se aprecia un alto grado de dispersión de los datos, sin embargo, en los tres sistemas estudiados se aprecian algunos puntos extremos alejados de la media. Los usos de PL, PLN, RV y PA son los que presentan los datos extremos más dispersos en los sistemas de uso. Por su parte, las propiedades físicas más influenciadas son: Da, PT, H°, Ma y Kh.

La Da presenta valores extremos en el sistema CSP bajo el uso PL mostrando tendencia a la compactación debido al pisoteo continuo del ganado. Por su parte la PT presenta el valor extremo más alto en el sistema CTR bajo el uso PL, pero los valores medios más altos están determinados en el sistema CAF, bajo el uso PA. Por su parte, la H° presenta los valores extremos más altos en el uso CTR, bajo el uso PL. La alta porosidad en el sistema tradicional es posible explicarla desde las labores de arado que se llevan a cabo al momento de establecimiento de las siembras, mientras que la humedad está influenciada por niveles freáticos altos en zonas influenciadas por un humedal natural.

En general, los sistemas empleados en la preparación del suelo para el establecimiento de pasturas mejoradas afectan las propiedades físicas que tienen relación con el agua en el suelo. La Ma presenta los valores medios más altos en el sistema CAF y los más bajos en el sistema CTR, por su parte, la Mi presenta los valores medios más altos en el sistema CTR, mostrando valores extremos en el sistema CSP bajo el uso PL, debido a las prácticas de labranza utilizadas por los agricultores de la región.

En cuanto a la Conductividad Hidráulica los valores más altos se presentaron en el sistema CAF, mientras los valores más bajos se presentaron en los usos CTR y CSP. Lo anterior se explica debido a los niveles de compactación que empiezan a generarse en los suelos bajo sistemas silvopastoriles y tradicionales, en especial los usos de PL y RV en los que el suelo está expuesto al establecimiento de diversos tipos de pasturas y sobrepastoreo, generando condiciones adversas para la conducción e infiltración del agua.

## **Capítulo 5**

# **Conclusiones y Referencias Bibliográficas**

## 7. Conclusiones

- El Indicador obtenido fue muy sensible porque pudo detectar las diferencias en la calidad del suelo al interior de un mismo tipo de uso y también posibilitó la evaluación de la diferencia a nivel de profundidad del suelo con respecto a las variables estudiadas.
- Los diversos sistemas de uso del suelo en el piedemonte amazónico tienen un efecto notorio sobre las propiedades que regulan la oferta hídrica como son: contenido de humedad, porosidad total, macroporosidad, mesoporosidad, microporosidad y conductividad hidráulica.
- Es posible obtener indicadores sintéticos robustos con un menor número de sitios evaluados, lo cual se evidenció en la Etapa 1 con un Índice de Correlación de 0.99.
- Es posible evaluar de forma confiable la calidad hídrica del suelo a una profundidad de 0-10 cm, lo cual se verificó en la Etapa 2 con un Índice de Correlación de 0.96.
- Los análisis de componentes principales efectuados mostraron que los diferentes grupos de variables físicas determinadas separan en forma significativa los diferentes usos del suelo, las ventanas paisajísticas y la profundidad en función de su calidad hídrica. Esta separación posibilitó identificar en estos suelos del piedemonte amazónico que el sistema agroforestal (CAF) y el sistema silvopastoril (SSP) representan mejores alternativas de uso que el sistema tradicional (CTR).



## 8. Bibliografía

Arshad, M.A., Martin, S. 2002. Identifying critical limits for soil quality indicators in agro-ecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 88 (2002) 153–160.

Ballesta Jiménez, R. y González Quiñones, V. 2006. La Calidad de Suelos como medida para su conservación. *Revista Edafología*, Vol 13 (3). Universidad Autónoma de Madrid. Departamento de Geología y Geoquímica. Madrid, España. p. 125-138.

Blanco – Sepulveda, Rafael. 2009. La relación entre la densidad aparente y la resistencia Mecánica como indicadores de la compactación del suelo. *Agrociencia* 43: 231-239.

Brauman, Kate A., Daily, Gretchen C., Duarte, T. Ka'eo and Mooney, Harold A. 2007. The Nature and Value of Ecosystem Services: An Overview Highlighting Hydrologic Services *Annu. Rev. Environ. Resour.* 32:6.1–6.32. *The Annual Review of Environment and Resources*. University of Colorado. 34 Pp.

Bautista Cruz, A.; Barra, J. Etchevers; del Castillo, R.F. y Gutiérrez, C. 2004. La calidad del suelo y sus indicadores. En: *Ecosistemas* 13(2): 90-97. Asociación Española de Ecología Terrestre AEET.

Campitelli, Paola; Aoki Antonio; Gudelj Olga; Rubenacker Andrea y Sereno, Roberto. 2010. Selección de indicadores de calidad de suelo para determinar los

efectos del uso y prácticas agrícolas en un área piloto de la región central de córdoba. *Ciencia del Suelo* 28(2):223-231.

Cantú, MP; A Becker, JC Bedano & HF Schiavo. 2007. Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices. *Ciencia del Suelo* 25(2):173-178.

Doran, J.W. y Parkin, B.T. 1994. *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. Soil Science Society of America, Inc. Special Publication. Number 35. Madison, Wisconsin, USA.

Estrada González, César A. 2004. Aporte al conocimiento y sostenibilidad del agroecosistema intervenido de la amazonia colombiana. Universidad de la Amazonía. Florencia, Caquetá. p. 11.

Evaluación de los Ecosistemas del Milenio, 2005. Los ecosistemas y el bienestar humano: humedales y agua. Informe de síntesis. World Resources Institute, Washington, DC. 80 p.

Grimaldi, Michel; Oszwald, Johan; Doledec, Sylvain; Hurtado, Maria del Pilar; Miranda, Izildinha de Souza; de Sartre, Xavier Arnauld; Santos de Assis, William; Castañeda, Edna; Desjardins, Thierry; Dubs, Florence; Guevara, Edward; Gond, Valery; Santana Lima, Tamara Thaiz; Marichal, Raphael; Michelotti, Fernando; Mitja, Danielle; Cornejo Noronha, Norberto; Delgado Oliveira, Mariana Nascimento; Ramírez, Bertha; Rodríguez, Gamaliel; Sarrazin, Max; Lopes da Silva, Jr Mario; Silva Costa, Luiz Gonzaga; Lindoso de Souza, Simao; Veiga, Iran; Velásquez, Elena and Lavelle, Patrick. 2014. Ecosystem services of regulation and support in Amazonian pioneer fronts: searching for landscape drivers. In: *Landscape Ecology*. Volume 29, Number 2. Springer Science - Business Media Dordrecht. 311- 328 Pp.

Herrick, J.E; Brown, J.R; Tugel, A.J; Shaver, P.L and Havstad, K.M. 2002. Application of soil quality to monitoring and management: paradigms from rangeland ecology. *Agronomy Journal* 94, 3–11.

Holdridge, L. 1978. *Ecología basada en zonas de vida*. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas (IICA). San José. 216 p.

Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas Sinchi. 2007. Balance anual sobre el estado de los ecosistemas y el ambiente de la amazonia colombiana 2006. Bogotá D.C.

Jaramillo Jaramillo, Daniel Francisco. 2002. *Introducción a la ciencia del suelo*. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Medellín. 619 PP.

Karlen, Douglas L. 2008. Soil Quality Assessment: Past, Present and Future. *Electronic Journal of Integrative Biosciences* 6(1):3-14. 29. December 2008. 12 p.

Klemens, E; Stierhof, T; Dauber, J; Kreimes, K. and Wolters, V. 2003. On the quality of soil biodiversity indicators: abiotic and biotic parameters as predictors of soil faunal richness at different spatial scales. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 98, 273–283.

Lal, Rattan. 1994. *Métodos y normas para evaluar el uso sostenible de los recursos suelo y agua en el trópico*. Servicio de apoyo para el manejo del suelo. Servicio de conservación del suelo (USDA). Agencia americana para el desarrollo internacional. SMSS Monografía técnica No.21. Corpoica - Regional seis. El Espinal Tolima. 96 Pp.

Lavelle, P.; Rodríguez, N.; Arguello, O.; Bernal, J.; Botero, C.; Chaparro, P.; Gómez, Y.; Gutiérrez, A.; Hurtado, M.; Loaiza, S.; Pullido, S.; Rodríguez, E.; Sanabria, C.; Velásquez, E. and Fonte, S. 2014. Soil ecosystem services and land

use in the rapidly changing Orinoco River Basin of Colombia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v. 185, p. 106–117.

Martinez, Luis Joel. 2006. Modelo para evaluar la calidad de las tierras: caso del cultivo de papa. *Agronomía Colombiana* 24(1): 96-110, 2006.

Mitchell, R.D.J., Harrison, R., Russell and K.J., Webb, J. 2000. The effect of crop residue incorporation date on soil inorganic nitrogen, nitrate leaching and nitrogen mineralization. *Biology and Fertility of Soils* 32, 294–301.

Montenegro, H. Malagón, D. (1990). *Propiedades físicas de los suelos*. Bogotá D.C. Instituto Geográfico Agustín Codazzi -IGAC. 813 Pp.

Navarrete Segueda, Armando; Vela Correa, Gilberto; López Blanco, Jorge; Rodríguez Gamiño, María de Lourdes. 2011. Naturaleza y utilidad de los indicadores de calidad del suelo. *ContactoS* 80, 29–37.

Pinzón Pinto, Ángela. 2009. *Apuntes sobre física de suelos*. Bogotá D.C. Universidad Jorge Tadeo Lozano. 205 Pp.

Pla Sentís, Ildfonso y Jaramillo, Daniel F. 2011. *Metodologías – Propiedades Físicas del Suelo*. Compilado por: Edgar Enrique Madero y Jorge Armando Ramírez. Escuela de Posgrados. Universidad Nacional de Colombia – Sede Palmira. 85 Pp.

Pla, Ildfonso. 2010. Degradación de suelos y desastres naturales: Enfoque hidrológico. En: *Memorias XII Congreso ecuatoriano de la ciencia del suelo*. Santo Domingo, 17-19 noviembre. 10 Pp.

Pla, Ildfonso. 2010. Medición y evaluación de las propiedades físicas de los suelos: dificultades y errores más frecuentes. I *Propiedades mecánicas*. En:

Revista Suelos Ecuatoriales; Volumen 40 No. 2. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Bogotá D.C. Pág. 75-93.

Rivera Peña, Mariela. 2008. Determinación de la Dinámica del Agua en el Sistema Agroforestal Quesungual e Identificación de Factores Suelo-Planta para el mejoramiento de la Productividad del Agua en los Cultivos. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Colombia – Sede Palmira. Escuela de Posgrados. Facultad de Ciencias Agrarias. Pp.28-29.

Rossi, J.P. Franc, A. Rousseau, G.X., 2009. Indicating soil quality and the GISQ. *Soil Biology & Biochemistry* 41 (2009) 444–445.

Ruiz-Camacho, N. 2004. Mise au point d'un système de bioindication de la qualité du sol base sur l'étude des peuplements de macro-invertébrés. Doctorate Dissertation, Université Paris VI, Paris, 270 p.

Schoeneberger, P.J., D.A. Wysocki, E.C. Benham, and Soil Survey Staff. 2012. Field book for describing and sampling soils, Version 3.0. Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, NE. p. 36.

Soil quality physical indicators: selecting dynamic soil properties to assess soil function. 2008. Soil quality technical No.10. United States Department of Agriculture USDA. Natural Resources Conservation Service NRCS. Soil Quality National Technology Development Team. 7 p.

Torrente Trujillo, Armando. 2007. Importancia de las propiedades físicas del suelo en el uso eficiente del agua en la agricultura de alto rendimiento. *Revista Suelos Ecuatoriales* 37 (1): 15-23. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo.

Velásquez Ibañez, Elena. 2004. Bioindicadores de calidad de Suelo basado en las poblaciones de macrofauna y su relación con las características funcionales

del suelo. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Colombia – Sede Palmira. Facultad de Agronomía. Palmira, Valle del Cauca. 165 PP.

Velásquez Ibañez, Elena. 2009. Los protagonistas de la restauración de la calidad del suelo avances y desafíos. *Suelos Ecuatoriales* 39 (1): 77-87.

Velásquez, E; Lavelle, P. Mercedes Andrade. 2007. GISQ, a multifunctional indicator of soil quality. *Soil Biology & Biochemistry*, v. 39, p. 3066-3088.

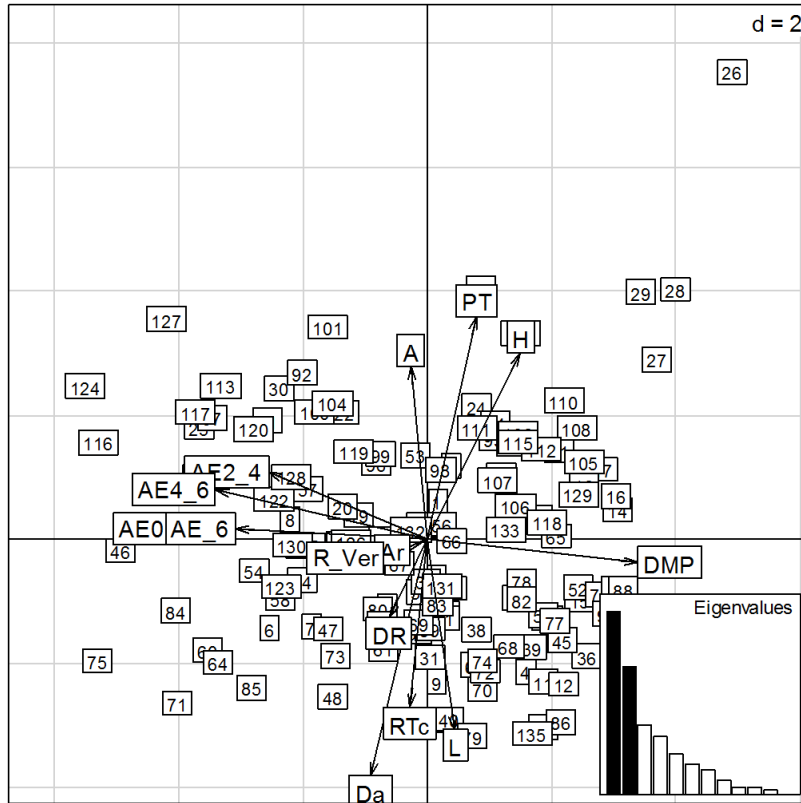
# Anexos

### 1. Metodologías Propiedades Físicas

| Determinaciones   | Metodología en Laboratorio  | Cálculos a Desarrollar   |  |
|---|---|--|--|
| <b>VARIABLES FISICAS</b>  |   |  |  |
| Densidad Aparente: Método Cilindro Volumen Conocido.                        | Método cilindro volumen conocido (Forsythe, 1980)   | $d_a = \left[ \frac{P_{ss} (g)}{V_c (cm^3)} \right]$   | d <sub>a</sub> : Densidad Aparente<br>P <sub>ss</sub> : Peso de suelo seco a 105°C<br>V <sub>c</sub> : Volumen del cilindro  |
| Densidad Real   | Método del Pícnómetro (IGAC, 1990)  | $d_r = \left[ \frac{P_{ss} (g)}{V_s (cm^3)} \right]$   | d <sub>r</sub> : Densidad Real (sólidos)<br>P <sub>ss</sub> : Peso de suelo seco a 105°C<br>V <sub>s</sub> : Volumen de sólidos  |
| Humedad Gravimétrica  | Relación entre la masa de agua y la masa seca de los sólidos del suelo (Montenegro y Malagón, 1990)                                   | $\Theta_w(\%) = \left[ \frac{P_w (g)}{P_{ss} (g)} \right] * 100$   | Θ <sub>w</sub> : Humedad gravimétrica.<br>P <sub>w</sub> : Peso del agua (peso suelo húmedo – peso suelo seco a 105°C).<br>P <sub>ss</sub> : Peso de suelos eco a 105°C.   |
| Humedad Volumétrica   | Relación entre el volumen de agua y el volumen total del suelo (Montenegro y Malagón, 1990)   | $\Theta_v(\%) = \left[ \frac{\Theta_w(\%) * d_a (g/cc)}{d_w (g/cc)} \right] * 100$   | Θ <sub>v</sub> : Humedad Volumétrica.<br>Θ <sub>w</sub> : Humedad gravimétrica.<br>d <sub>a</sub> : Densidad Aparente.<br>d <sub>w</sub> : Densidad del agua.  |
| Distribución de agregados estables al agua. Diámetro Medio Ponderado (DMP). | Método de Yoder (1936; modificado). Tamices 6, 4, 2, 1, 0.125 mm.   | $DMP = \left[ \frac{\sum_{i=1} M_{ssi}(\%) * X_i (mm)}{100} \right]$   | DMP: Diámetro medio ponderado.<br>M <sub>ssi</sub> : Agregados del suelo retenidos en cada tamiz.<br>X <sub>i</sub> : Promedio del diámetro de abertura del tamiz.   |
| Análisis granulométrico. Textura  | Método Hidrómetro o Bouyoucos (Forsythe, 1975).   | A(%)= 100 – (Lc 40s/ Ps) * 100<br>Ar(%)= 100 – (Lc 2 h/ Ps) * 100<br>L(%)= 100 – (A(%) + Ar(%))  | A(%): Porcentaje de arena.<br>Lc 40 s: Lectura corregida a 40 segundos.<br>Ar(%): Porcentaje de arcilla.<br>Lc 2 h: Lectura corregida a 2 horas.<br>Ps: Peso del suelo.<br>L(%): Porcentaje de limo.   |
| Curvas de Retención de Humedad  | Cilindros sometidos a presión 75 cm en Mesa de Tensión y 0.3, 1 y 15 bares en ollas y platos de presión (Montenegro y Malagón, 1990). | Θ <sub>v</sub> = (75 atm, 0.3, 1 y 15 bares)<br>$\Theta_v(\%) = \left[ \frac{\Theta_w(\%) * d_a (g/cc)}{d_w (g/cc)} \right] * 100$   | Θ <sub>v</sub> : Humedad Volumétrica.<br>Θ <sub>w</sub> : Humedad gravimétrica.<br>d <sub>a</sub> : Densidad Aparente.<br>d <sub>w</sub> : Densidad del agua.  |
| Conductividad Hidráulica saturada   | Método permeámetro de cabeza constante (Forsythe, 1980).  | $K_s = \left[ \frac{V (cm^3)}{T (min) A (cm^2)} * \frac{L (cm)}{H (cm)} \right]$   | K <sub>s</sub> : Conductividad hidráulica saturada (cm/h).<br>V: Volumen total de agua que paso por el cilindro.<br>t: Tiempo total.<br>A: Área transversal interna del cilindro.<br>L: Longitud de la columna de suelo.<br>H: Longitud de la Columna de agua. |
| Porosidad Total   |   | PT(%)= 1 – (d <sub>a</sub> / d <sub>r</sub> ) *100<br>Ma(%)= (PT- Θ <sub>v</sub> 7.5 Kpa)<br>Me(%)= (Θ <sub>v</sub> 7.5 Kpa – Θ <sub>v</sub> 1500 Kpa )<br>Mi(%)= (Θ <sub>v</sub> 1500 Kpa). | PT: Porosidad total.<br>d <sub>a</sub> : Densidad Aparente<br>d <sub>r</sub> : Densidad Real<br>Ma: Macroporos<br>Θ <sub>v</sub> : Humedad Volumétrica.<br>Me. Mesoporos.<br>Mi: Microporos.   |

### 2. Análisis de Componentes Principales (Etapa 1-A)

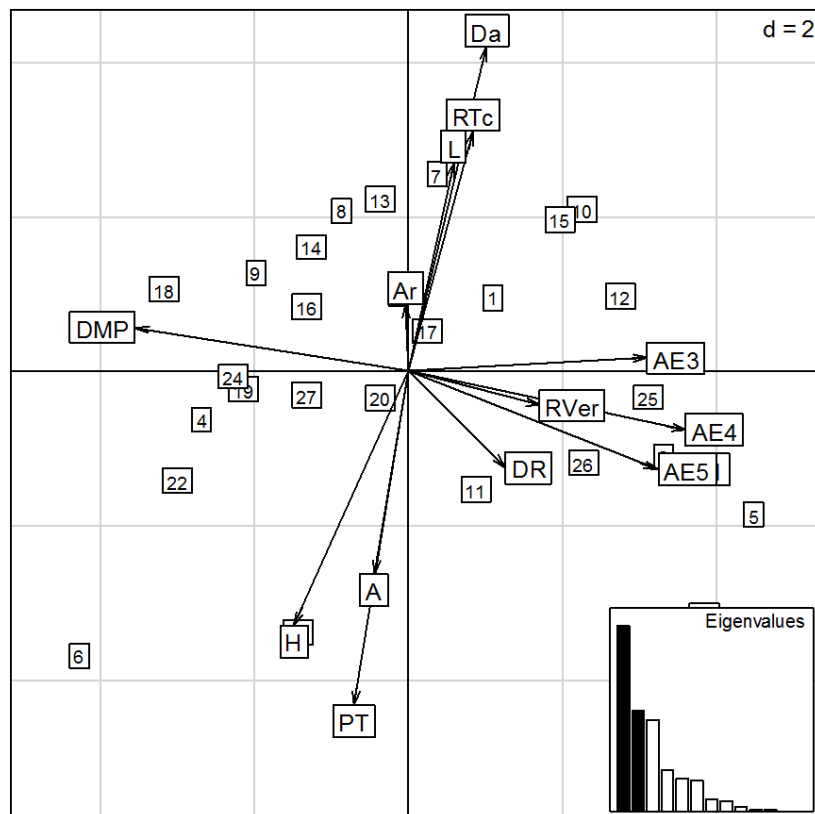
El siguiente gráfico representa las variables, los puntos de análisis y el histograma para la Etapa 1-A: 135 puntos, 9 variables a 0-10 cm. También se presenta la matriz de correlaciones para esta etapa de análisis.



|          | A      | L      | Ar     | Da     | DR     | PT     | H      | AE0125_1 | AE1_2  |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|--------|
| A        | 1.000  | -0.876 | -0.468 | -0.270 | -0.233 | 0.219  | 0.078  | -0.007   | 0.102  |
| L        | -0.876 | 1.000  | -0.015 | 0.338  | 0.306  | -0.272 | -0.146 | 0.003    | -0.201 |
| Ar       | -0.468 | -0.015 | 1.000  | -0.059 | -0.077 | 0.045  | 0.107  | 0.010    | 0.157  |
| Da       | -0.270 | 0.338  | -0.059 | 1.000  | 0.199  | -0.973 | -0.811 | 0.150    | 0.042  |
| DR       | -0.233 | 0.306  | -0.077 | 0.199  | 1.000  | 0.033  | -0.137 | 0.214    | 0.075  |
| PT       | 0.219  | -0.272 | 0.045  | -0.973 | 0.033  | 1.000  | 0.798  | -0.103   | -0.025 |
| H        | 0.078  | -0.146 | 0.107  | -0.811 | -0.137 | 0.798  | 1.000  | -0.200   | -0.228 |
| AE0125_1 | -0.007 | 0.003  | 0.010  | 0.150  | 0.214  | -0.103 | -0.200 | 1.000    | 0.666  |
| AE1_2    | 0.102  | -0.201 | 0.157  | 0.042  | 0.075  | -0.025 | -0.228 | 0.666    | 1.000  |
| AE2_4    | 0.162  | -0.270 | 0.159  | -0.088 | -0.076 | 0.069  | -0.140 | 0.332    | 0.772  |
| AE4_6    | 0.102  | -0.201 | 0.157  | 0.042  | 0.075  | -0.025 | -0.228 | 0.666    | 1.000  |
| AE_6     | -0.007 | 0.003  | 0.010  | 0.150  | 0.214  | -0.103 | -0.200 | 1.000    | 0.666  |
| DMP      | -0.133 | 0.131  | 0.035  | -0.143 | -0.150 | 0.109  | 0.315  | -0.786   | -0.830 |
| RTc      | -0.403 | 0.388  | 0.126  | 0.405  | 0.186  | -0.371 | -0.355 | -0.137   | 0.032  |
| R_Ver    | 0.006  | -0.027 | 0.038  | 0.061  | 0.019  | -0.060 | -0.093 | 0.053    | 0.155  |
|          | AE2_4  | AE4_6  | AE_6   | DMP    | RTc    | R_Ver  |        |          |        |
| A        | 0.162  | 0.102  | -0.007 | -0.133 | -0.403 | 0.006  |        |          |        |
| L        | -0.270 | -0.201 | 0.003  | 0.131  | 0.388  | -0.027 |        |          |        |
| Ar       | 0.159  | 0.157  | 0.010  | 0.035  | 0.126  | 0.038  |        |          |        |
| Da       | -0.088 | 0.042  | 0.150  | -0.143 | 0.405  | 0.061  |        |          |        |
| DR       | -0.076 | 0.075  | 0.214  | -0.150 | 0.186  | 0.019  |        |          |        |
| PT       | 0.069  | -0.025 | -0.103 | 0.109  | -0.371 | -0.060 |        |          |        |
| H        | -0.140 | -0.228 | -0.200 | 0.315  | -0.355 | -0.093 |        |          |        |
| AE0125_1 | 0.332  | 0.666  | 1.000  | -0.786 | -0.137 | 0.053  |        |          |        |
| AE1_2    | 0.772  | 1.000  | 0.666  | -0.830 | 0.032  | 0.155  |        |          |        |
| AE2_4    | 1.000  | 0.772  | 0.332  | -0.593 | 0.162  | 0.265  |        |          |        |
| AE4_6    | 0.772  | 1.000  | 0.666  | -0.830 | 0.032  | 0.155  |        |          |        |
| AE_6     | 0.332  | 0.666  | 1.000  | -0.786 | -0.137 | 0.053  |        |          |        |
| DMP      | -0.593 | -0.830 | -0.786 | 1.000  | -0.015 | -0.075 |        |          |        |
| RTc      | 0.162  | 0.032  | -0.137 | -0.015 | 1.000  | 0.225  |        |          |        |
| R_Ver    | 0.265  | 0.155  | 0.053  | -0.075 | 0.225  | 1.000  |        |          |        |

### 3. Análisis de Componentes Principales (Etapa 1-B)

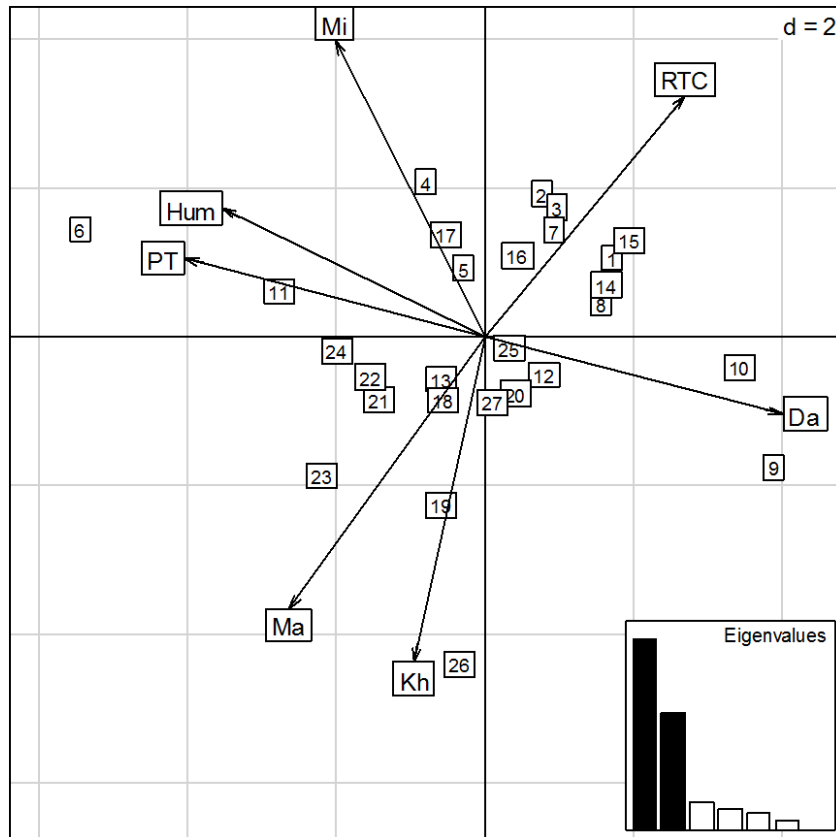
El siguiente gráfico representa las variables, los puntos de análisis y el histograma para la Etapa 1-B: 135 puntos, 9 variables a 0-10 cm. También se presenta la matriz de correlaciones para esta etapa de análisis.



|      |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| A    | 1.000  | -0.793 | -0.630 | -0.122 | -0.147 | 0.081  | -0.072 | 0.070  | -0.083 | -0.234 |
| L    | -0.793 | 1.000  | 0.027  | 0.220  | 0.084  | -0.195 | 0.004  | -0.009 | 0.073  | 0.176  |
| Ar   | -0.630 | 0.027  | 1.000  | -0.082 | 0.134  | 0.116  | 0.114  | -0.105 | 0.043  | 0.160  |
| Da   | -0.122 | 0.220  | -0.082 | 1.000  | -0.122 | -0.944 | -0.836 | 0.140  | 0.051  | 0.084  |
| DR   | -0.147 | 0.084  | 0.134  | -0.122 | 1.000  | 0.329  | 0.025  | 0.283  | 0.297  | 0.157  |
| PT   | 0.081  | -0.195 | 0.116  | -0.944 | 0.329  | 1.000  | 0.834  | -0.055 | 0.001  | -0.064 |
| H    | -0.072 | 0.004  | 0.114  | -0.836 | 0.025  | 0.834  | 1.000  | -0.198 | -0.250 | -0.192 |
| AE01 | 0.070  | -0.009 | -0.105 | 0.140  | 0.283  | -0.055 | -0.198 | 1.000  | 0.744  | 0.477  |
| AE2  | -0.083 | 0.073  | 0.043  | 0.051  | 0.297  | 0.001  | -0.250 | 0.744  | 1.000  | 0.853  |
| AE3  | -0.234 | 0.176  | 0.160  | 0.084  | 0.157  | -0.064 | -0.192 | 0.477  | 0.853  | 1.000  |
| AE4  | -0.083 | 0.073  | 0.043  | 0.051  | 0.297  | 0.001  | -0.250 | 0.744  | 1.000  | 0.853  |
| AE5  | 0.070  | -0.009 | -0.105 | 0.140  | 0.283  | -0.055 | -0.198 | 1.000  | 0.744  | 0.477  |
| DMP  | -0.065 | -0.071 | 0.198  | -0.250 | -0.189 | 0.176  | 0.331  | -0.917 | -0.843 | -0.649 |
| RTc  | -0.600 | 0.515  | 0.326  | 0.283  | 0.091  | -0.257 | -0.200 | -0.127 | 0.188  | 0.378  |
| RVer | -0.052 | 0.048  | 0.023  | -0.077 | 0.372  | 0.141  | -0.086 | 0.145  | 0.435  | 0.562  |
|      | AE4    | AE5    | DMP    | RTc    | RVer   |        |        |        |        |        |
| A    | -0.083 | 0.070  | -0.065 | -0.600 | -0.052 |        |        |        |        |        |
| L    | 0.073  | -0.009 | -0.071 | 0.515  | 0.048  |        |        |        |        |        |
| Ar   | 0.043  | -0.105 | 0.198  | 0.326  | 0.023  |        |        |        |        |        |
| Da   | 0.051  | 0.140  | -0.250 | 0.283  | -0.077 |        |        |        |        |        |
| DR   | 0.297  | 0.283  | -0.189 | 0.091  | 0.372  |        |        |        |        |        |
| PT   | 0.001  | -0.055 | 0.176  | -0.257 | 0.141  |        |        |        |        |        |
| H    | -0.250 | -0.198 | 0.331  | -0.200 | -0.086 |        |        |        |        |        |
| AE01 | 0.744  | 1.000  | -0.917 | -0.127 | 0.145  |        |        |        |        |        |
| AE2  | 1.000  | 0.744  | -0.843 | 0.188  | 0.435  |        |        |        |        |        |
| AE3  | 0.853  | 0.477  | -0.649 | 0.378  | 0.562  |        |        |        |        |        |
| AE4  | 1.000  | 0.744  | -0.843 | 0.188  | 0.435  |        |        |        |        |        |
| AE5  | 0.744  | 1.000  | -0.917 | -0.127 | 0.145  |        |        |        |        |        |
| DMP  | -0.843 | -0.917 | 1.000  | 0.002  | -0.262 |        |        |        |        |        |
| RTc  | 0.188  | -0.127 | 0.002  | 1.000  | 0.339  |        |        |        |        |        |
| RVer | 0.435  | 0.145  | -0.262 | 0.339  | 1.000  |        |        |        |        |        |

#### 4. Análisis de Componentes Principales (Etapa 2-B)

El siguiente gráfico representa las variables, los puntos de análisis y el histograma para la Etapa 2-B: 27 puntos, 7 variables a 0-10 cm. También se presenta la matriz de correlaciones para esta etapa de análisis.



|    | A      | L      | Ar     | Da     | DR     | PT     | H      |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| A  | 1.000  | -0.876 | -0.468 | -0.270 | -0.233 | 0.219  | 0.078  |
| L  | -0.876 | 1.000  | -0.015 | 0.338  | 0.306  | -0.272 | -0.146 |
| Ar | -0.468 | -0.015 | 1.000  | -0.059 | -0.077 | 0.045  | 0.107  |
| Da | -0.270 | 0.338  | -0.059 | 1.000  | 0.199  | -0.973 | -0.811 |
| DR | -0.233 | 0.306  | -0.077 | 0.199  | 1.000  | 0.033  | -0.137 |
| PT | 0.219  | -0.272 | 0.045  | -0.973 | 0.033  | 1.000  | 0.798  |
| H  | 0.078  | -0.146 | 0.107  | -0.811 | -0.137 | 0.798  | 1.000  |

