



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Zonificación del Comportamiento Espacial de las Propiedades Hidrodinámicas del Suelo en el Distrito de Riego RUT.

Leonardo Castillo Sánchez

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Agropecuarias
Palmira, Colombia

2016

Zonificación del Comportamiento Espacial de las Propiedades Hidrodinámicas del Suelo en el Distrito de Riego RUT.

Leonardo Castillo Sánchez

Tesis o trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ciencias Agrarias

Director:

Ph.D., Juan Carlos Menjivar Flores

Codirector:

MSc. Candidato a Ph.D, Andrés Echeverry Sánchez

Línea de Investigación:

Suelos

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Agropecuarias
Palmira, Colombia

2016

Dedicatoria

Dedico este importante paso en mi vida a:

A Dios que me brinda todos los medios y me bendice en todos los momentos de mi vida.

A la virgen María que me ilumina y me cubre con su santo manto.

A mi madre Marleny que me guía y me muestra el camino desde el cielo y mi padre Abelardo que desde el cielo me protege e ilumina

A mi abuela Ana Felisa que desde el cielo me guía.

A mi tía Sonia que es mi segunda mama y lucho por mi futuro dejando todas sus fuerzas por ello.

A mi compañerita y esposa Adriana, que me da ánimo, me ayuda, me tiene paciencia y está pendiente de mí siempre.

A mis hermanos Diego y Andrés.

A mis tías Betty y Pureza que también aportaron a esta meta su apoyo y comprensión.

A mis sobrinos Nana, Julián, Natalia, Camila y Santiago; también a Karen para que tomen como ejemplo de superación y vida esta experiencia.

Al Dr. Ciro a quien he tomado como un segundo padre por su gran apoyo, guía, cariño y a quien debo todo mi respeto, mi aprecio, lealtad y gratitud.

Agradecimientos

Al profesor Andrés Echeverry por su paciencia guía, consejos ilustración y colaboración, además sin su capacidad profesional este proyecto no se hubiera podido realizar.

Al profesor Juan Carlos Menjivar por su paciencia, consejo, dirección, ayuda desinteresada y acompañamiento en el proceso.

Al profesor Aldemar Reyes por su apoyo y colaboración

A mis amigos James y Aldemar por su gran apoyo y valiosa colaboración en la fase de campo sin la cual no habría sido posible obtener datos.

A los muchachos Oscar, Diana, Jenny, Harold, Luis Miguel, William, Camilo, Arnulfo, Jhon Eliseo, Santiago por el buen trabajo en campo.

A don Evelio Varela por su apoyo, confianza respeto e impulso.

Al Dr. Ciro Escarria por su invaluable apoyo, confianza, cariño, respeto e interés por la ciencia sin su interés nada de este proyecto se hubiera podido cristalizar.

A mi amigo Carlos José por su acompañamiento, amistad, conocimientos, trabajo en equipo y por hacer más amables esos momentos difíciles.

Resumen

El presente estudio se realizó dentro del área de influencia de uno de los distritos de riego más importante de Colombia, como lo es el distrito de adecuación de tierras de los municipios de Roldanillo, La unión y Toro en el norte del departamento del Valle del Cauca. Se tuvieron 100 puntos de muestreo dentro de las 13 zonas en las cuales se divide el área del distrito de riego RUT en cuyos puntos de muestreo se midieron la densidad aparente, diámetro medio ponderado, micro porosidad, macro porosidad, conductividad hidráulica saturada y lámina de agua aprovechable, como principales propiedades hidrodinámicas del suelo, estos datos se midieron a una profundidad de 25 cms. Como referencia para las características de estos suelos se tomó el levantamiento de suelos y zonificación de tierras del Departamento del Valle del Cauca realizado por IGAC- CVC en el año 2004, dicha caracterización encontró 7,869 hectáreas de orden Inceptisol y 2,297 hectáreas dentro del orden Molisol, como las áreas de mayor influencia dentro de la zona de estudio. El objetivo general del estudio era zonificar el comportamiento espacial de las propiedades hidrodinámicas del suelo en el distrito de riego RUT con fines de planificación de la producción, verificar la conveniencia de algunas labores de preparación de los suelos para lo cual se debía interpolar los resultados de los datos obtenidos en campo y poder zonificar algunos comportamientos. La selección del método de interpolación se realizó teniendo en cuenta la proporción de varianza explicada, pues según Terra Santos (2008) los valores mayores a 75% significan existencia de alta correlación geo estadística entre los datos, por el contrario, valores menores significan baja correlación. En el primer caso se recomiendan métodos geo estadísticos y en el segundo métodos determinísticos. Las interpolaciones se realizaron mediante el uso de la extensión Geostatistical Analyst del ArcGis 10.3.1. Se utilizó el modelo de semivariograma identificado como de mejor ajuste en el análisis exploratorio de datos y se obtuvieron una serie de superficies raster con valores de cada parámetro para la zona de estudio, posteriormente se generaron los planos de las características medidas. Los resultados arrojan una tendencia a la degradación física generalizada en los suelos del distrito RUT, con alta presencia de micro

poros, bajos niveles de macro poros, niveles medios de humedad aprovechable y una franja hacia la zona norte del RUT con posibles afectaciones por compactación.

Palabras Claves: Distrito de Riego, Lámina de Agua Aprovechable, Inceptisol, Molisol, Geo estadística, Interpolación.

Abstract

This study was conducted within the area of influence of one of the districts most important irrigation of Colombia, as is the district land improvement of the municipalities of Roldanillo, La Union y Toro in the northern department of Valle del Cauca. 100 sampling points were taken within the 13 areas in which the area of the irrigation district RUT whose sampling points is divided bulk density, weighted average diameter, micro porosity, macro porosity, saturated hydraulic conductivity and sheet were measured available water, as main soil hydrodynamic properties, these data were measured at a depth of 25 cms. Reference to the characteristics of these soils soil survey and land zoning Department of Valle del Cauca by IGAC- CVC in 2004 was taken, this characterization found 7,869 hectares and 2,297 hectares Inceptisol order within the order Mollisol, as the areas of greatest influence within the study area. The overall objective of the study was rezoned the spatial behavior of the hydrodynamic properties of the soil in the irrigation district RUT for planning production, verify the suitability of some work of soil preparation for which was due interpolate results the data obtained in the field and to zonificar some behaviors. The selection of the method of interpolation was made taking into account the proportion of variance explained, because according Terra Santos (2008) values greater than 75% mean existence of high correlation geo statistics from the data, however, lower values mean low correlation. In the first case statistical methods geo and second deterministic methods are recommended. Interpolations were made using the Geostatistical Analyst extension of ArcGIS 10.3.1. variogram model identified as best fit in exploratory data analysis was used and a series of raster surfaces with values for each parameter for the study area were obtained, then the planes of the measured characteristics were generated. The results show a tendency to widespread physical degradation in soils RUT district, with a high presence of micro pores, low levels of macro pores, average levels of soil moisture and a strip to the north of the RUT with possible effects by compaction.

Keywords: Irrigation District, Water Blade Exploitable, Inceptisol, Mollisol, Geo statistics, Interpolation.

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
Lista de figuras	XIII
Lista de tablas	XIV
Introducción	1
1. Marco Teórico	5
1.1 Recurso Suelo	5
1.2 Contexto e Importancia Ambiental de los Suelos	6
1.3 Concepto de Degradación	8
1.4 Propiedades Hidrodinámicas del Suelo	10
1.4.1 Densidad Aparente	10
1.4.2 Porosidad.....	11
1.4.3 Contenido de Humedad del Suelo.....	14
1.4.4 Retención de la Humedad del Suelo	14
1.4.5 Constantes de Humedad del Suelo	15
1.4.6 La Curva de Retención de Humedad del Suelo.....	16
1.4.7 Movimiento del Agua en el Suelo	17
1.4.8 Infiltración.....	18
1.4.9 La Conductividad Hidráulica del Suelo	19
1.4.10 Estabilidad Estructural.....	20
1.5 Variabilidad Espacial de los Suelos	22
1.6 Sistemas de Información Geográfica	23
1.7 Geo estadística.....	26
1.8 Métodos de Interpolación Determinísticos	27
1.9 Métodos de Interpolación Geo estadísticos.....	29
1.10 Antecedentes de Zonificación de Propiedades Físicas del Suelo con SIG.....	32
2. Objetivos	36
2.1 Objetivo General.....	36
2.2 Objetivos Específicos.....	36
3. Materiales y Métodos	37
3.1 Localización del Área de Estudio	37
3.2 Caracterización Propiedades Hidrodinámicas.....	39
3.2.1 Selección Puntos de Muestreo.....	39
3.2.2 Diseño del Muestreo	40
3.2.3 Toma de Muestras en Campo	43
3.2.4 Análisis Estadístico de Resultados.....	44
3.3 Interpolación de Parámetros.....	45
3.3.1 Análisis Exploratorio de Datos.....	45
3.3.2 Interpolación	45
3.4 Correlación de Resultados.....	46
4. Resultados y Discusión	48

4.1	Evaluación de los parámetros Determinados	48
4.2	Verificación de Equivalencia e Independencia de los Parámetros Estudiados	51
4.3	Interpolaciones y Validación	52
4.4	Interpretación de Parámetros	54
4.4.1	Estabilidad Estructural	54
4.4.2	Almacenamiento de Agua	58
4.4.3	Movimiento Interno del Agua	70
4.5	Correlaciones	79
4.5.1	Ordenes Taxonómicos	79
4.5.2	PMgl	83
5.	Conclusiones y Recomendaciones	86
5.1	Conclusiones	86
5.2	Recomendaciones	87
A.	Anexo: Ubicación Puntos de Muestreo (0-50).....	91
B.	Anexo: Ubicación Puntos de Muestreo (51-100).....	93
C.	Anexo: Taxonomía Puntos de Muestreo (0-35 puntos).....	94
D.	Anexo: Taxonomía Puntos de Muestreo (36-70 puntos).....	95
E.	Anexo: Taxonomía Puntos de Muestreo (71-100 puntos).....	96
6.	Bibliografía	97

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Comportamiento teórico de la tensión de humedad del suelo según textura	17
Figura 3-1: Localización puntos de muestreo	39
Figura 3-2: Distribucion puntos de muestreo Ks	43
Figura 4-1: Histogramas DPM, Da, microporosidad, macroporosidad y Ks.....	49
Figura 4-2: Comportamiento DPM en el RUT	58
Figura 4-3: Comportamiento Da en el área RUT	63
Figura 4-4: Comportamiento Micro poros en el área RUT	67
Figura 4-5: Comportamiento LAA en el área RUT	70
Figura 4-6: Comportamiento macroporos en el área RUT	75
Figura 4-7: Comportamiento Ks en el área RUT	78

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1: Rangos de densidad aparente.....	11
Tabla 1-2: Rangos de macroporosidad.....	12
Tabla 1-3: Clasificación porosidad del suelo.....	13
Tabla 1-4: Clasificación valores de LAA	16
Tabla 1-5: Valores rangos de infiltración.....	19
Tabla 1-6: Rangos de valores de K saturado.....	20
Tabla 1-7: Interpretación DPM.....	22
Tabla 3-1: Ordenes de suelo distrito RUT.....	37
Tabla 3-2: Distribución de suelos distrito RUT por unidad cartográfica	38
Tabla 3-3: Distribución de muestras por UCS.....	41
Tabla 3-4: Distribución de muestras Ks	42
Tabla 3-5: Relación parámetros evaluados	44
Tabla 3-6: Relación fuentes utilizadas	46
Tabla 4-1: Resumen de los parámetros determinados	49
Tabla 4-2: Relación de grupos de los parámetros estudiados y el parámetro textura	52
Tabla 4-3: Parámetros semi variogramas de mejor ajuste	53
Tabla 4-4: Indicadores de validación de interpolaciones.....	53
Tabla 4-5: Correlación Da y órdenes taxonómicos	79
Tabla 4-6: Correlación DPM y órdenes taxonómicos	80
Tabla 4-7: Correlación LAA y ordenes taxonomicos	81
Tabla 4-8: Correlación Ks y ordenes taxonomicos.....	82
Tabla 4-9: Correlacion PMgl y DPM	83
Tabla 4-10: Correlacion PMgl y LAA	84
Tabla 4-11: Correlacion PMgl y Ks	85

Introducción

El Distrito de Riego RUT es actualmente uno de los más importantes del país, cuenta con 11.048 ha, de suelos cultivables y está dotado con infraestructura de riego, drenaje, control de inundaciones y vías. En 1.958 la C.V.C inicia las obras de adecuación de 11.500 ha de tierra en el sector, de las cuales 1.500 permanecían inundadas, 3.500 sufrían inundaciones periódicas, 2.500 únicamente se podían utilizar para pastos por su alto grado de humedad y sólo 4.000 eran parcialmente explotables en agricultura y ganadería. Así quedaron 10.200 ha de suelos de la zona plana de los tres municipios de influencia directa de la infraestructura del RUT (Roldanillo, La Unión y Toro), suelos que antes eran inundables en dos flancos uno por las avenidas del río Cauca y otro por las aguas de escorrentía de la cordillera occidental, así como los ríos y quebradas que bajan de dicho sector.

En la actualidad y después de la construcción de este tipo de infraestructura y de su muy buena funcionalidad al día de hoy, estas tierras son consideradas la despensa hortofrutícola de Colombia y según MADR et al., (2006), representa la zona de mayor importancia para el Plan Frutícola del Departamento del Valle, contribuyendo con el 50% de los alimentos en el Valle del Cauca, el 12% de la producción frutícola nacional, y el 42% del PIB del departamento (Urrutia, 2011).

Sin embargo y con la magnitud e importancia de estos suelos de producción agrícola, desde antes de realizada la transferencia en la administración a la asociación de usuarios (ASORUT) en el año 1989, no se realizan estudios de suelos de ninguna índole que permitan conocer los estados físicos, químicos y biológicos de estos suelos, el último estudio con el que a rasgos generales se puede contar es el levantamiento que realizó el IGAC en el año 2004 y que sirve de referencia para el presente estudio.

Tras cerca de 50 años de uso intensivo en la agricultura y diversas formas de producción, los productores no conocen las condiciones en las cuales se están desarrollando sus suelos, pero si han venido observando como sus producciones han venido disminuyendo en cantidad y calidad, esto sin tener una idea del por qué les está ocurriendo, así como el aumento en el requerimiento de enmiendas, abonos, pesticidas, fungicidas y demás

productos de tipo químico utilizados casi sin ningún control y seguimiento para evaluar su real efectividad.

De allí surge la necesidad de realizar una evaluación del estado actual de las propiedades hidrodinámicas de los suelos agrícolas del distrito de riego RUT, evaluar los posibles riesgos de degradación, zonificarlos y poder identificar cuáles son los factores que pueden incidir en dicha degradación, para brindarle a la asociación de usuarios una herramienta que le permita encaminar a sus asociados a nuevas prácticas de manejo productivo, que sean realmente eficaces, un poco más económicas y que sobre todo propendan por la conservación del recurso suelo, que es realmente el alma de la infraestructura del distrito de riego RUT.

La presente investigación se realizó con el propósito de evaluar las características físicas y algunas propiedades hídricas de suelos del distrito RUT, para entender el movimiento del agua, proponer prácticas de manejo y orientar la investigación futura.

Se inició colectando la información básica secundaria, sobre las características morfológicas y taxonómicas de los suelos del distrito RUT, lo que permitió reconocer características generales y algunas variantes en su origen. Luego de aplicar las metodologías convencionales tanto en campo como en laboratorio para su valoración y evaluación, se hicieron los ajustes metodológicos necesarios, se examinó la variabilidad espacial de las principales propiedades hidro – dinámicas e integró el conjunto de la información obtenida para la caracterización física de los suelos.

Para dicha caracterización se generaron planos con la información obtenida en campo de los parámetros diámetro ponderado medio (DPM), densidad aparente (D_a), porcentaje de micro poros, porcentaje de macro poros, Conductividad Hidráulica saturada (K_s), Lámina de agua aprovechable (LAA).

Con los parámetros medidos y los planos generados se realizaron correlaciones con información obtenida en otros trabajos realizados en la misma área de estudio y cuyas interacciones esperábamos nos arrojaran información valiosa para la planificación productiva de los suelos del distrito RUT, los parámetros con los cuales se realizó correlaciones fueron Ordenes Taxonómicos y Porcentaje de Magnesio Intercambiable (PMgI).

Las márgenes deben ser de 2,54 centímetros (1 pulgada) en la parte superior, inferior y exterior y de 3,6 centímetros en la margen interna (a partir de márgenes simétricos). La plantilla está diseñada para imprimir por lado y lado en hojas tamaño carta. Se sugiere que los encabezados cambien según la sección del documento (para lo cual esta plantilla está construida por secciones). El número de página se ubica en la parte superior derecha en las páginas impares y en la superior izquierda en las páginas pares (en letra Arial de 11 puntos, de acuerdo al formato presentado en esta plantilla). El título de cada capítulo debe estar numerado y comenzar en una hoja independiente (página impar) y con el mismo formato del título Introducción (escrita con minúscula, en la primera línea, con un espaciado anterior de 100 puntos y posterior de 24 puntos e interlineado sencillo y en letra de 20 puntos y negrilla; en este caso se usa Arial). El texto debe llegar hasta la margen inferior establecida. Se debe evitar títulos o subtítulos solos al final de la página o renglones sueltos.

1. Marco Teórico

1.1 Recurso Suelo

El suelo es un sistema complejo, heterogéneo, disperso y cambiante en el espacio y el tiempo. Como un cuerpo trifásico donde se mezclan materiales sólidos, líquidos (agua), gaseosos (aire) y coloidal, muestra gran dinamismo. La composición y proporción como estos componentes se encuentran en el suelo determinan sus propiedades físicas, y su adecuada relación determina su capacidad de uso, es decir, de permitir el crecimiento de las plantas y la disponibilidad de agua y nutrientes para ellas. Según (Hincapié, 2011), se considera necesario, conocer las propiedades físicas del suelo, para entender cómo influyen en el desarrollo de las plantas, conocer la manera como la actividad humana puede llegar a modificarlas, y comprender la importancia de mantener las mejores condiciones físicas del suelo, impidiendo su degradación o pérdida. Las funciones del suelo como la productividad, la infiltración, la regulación de flujos de agua, el control sobre los ciclos de nutrientes y el soporte estructural y la resistencia a la degradación, son el resultado de la interacción de las diversas propiedades del suelo; es decir de sus propiedades físicas, químicas y biológicas, las que a su vez indican que tan adecuadamente un suelo funciona y que tan susceptible es a la alteración (Hincapié, 2011).

Según (Hincapié, 2011), la forma de distribución y almacenaje del agua en el suelo es importante desde el punto de vista agronómico y ambiental, ya que afecta reacciones químicas, procesos físicos y biológicos que ocurren dentro del suelo y fuera de este y que influyen en la nutrición, crecimiento y desarrollo de las plantas, en la regulación hidrológica y entre otros en la pérdida de agua y elementos químicos hacia estratos profundos. Entender la dinámica del agua en los suelos es de gran importancia, tanto agronómica como ambiental, lo cual permita un uso y manejo adecuado del recurso suelo, evitando su degradación y pérdida (Hincapié, 2011).

El suelo no fue creado para los usos primarios que tiene actualmente (explotación agrícola, pecuaria o industrial), estos son impactos antrópicos propiciados por el hombre, lo que representa una gran modificación en su entorno, por lo que el suelo reacciona produciendo una serie de cambios, muchas veces negativos que afectan sus propiedades llevándolo a procesos de degradación. La pérdida o disminución de las propiedades del suelo se considera una consecuencia directa de la explotación del recurso suelo por parte del hombre a través de acciones directas o indirectas.

Algunas de las propiedades que tienen mayor incidencia en el flujo del agua en el suelo son la textura, la densidad aparente, la estructura, la porosidad, el contenido de materia orgánica, entre otras (Bormann, 2010; Kodesova et al., 2011). A partir de estas propiedades es posible estimar indirectamente las características hidráulicas del suelo.

1.2 Contexto e Importancia Ambiental de los Suelos

Según (CCE, 2002), el suelo como capa superior de la corteza terrestre, desempeña una serie de funciones claves tanto ambientales como sociales y económicas, que resultan fundamentales para la vida. La agricultura del suelo para el suministro de agua y nutrientes, así como para su soporte físico. La capacidad de almacenaje, filtración, amortiguación y transformación convierte al suelo en uno de los principales factores para la protección del agua y el intercambio de gases con la atmósfera. (CCE, 2002).

Con el propósito de proteger las propiedades del recurso suelo, es necesario conservar en buen estado su calidad. Sin embargo, este recurso está cada vez más amenazado por las actividades humanas que contribuyen a su degradación y deterioro (CCE, 2002). El suelo se enfrenta, entre otras, a procesos de degradación: erosión, disminución de la materia orgánica, contaminación, sellado, compactación, salinización y pérdida de biodiversidad, además de la aceleración que el cambio climático puede estar causando a los procesos de degradación (CCE, 2002).

La AEMA, en el año 2002, menciona que el suelo constituye la base del 90% de la producción de alimentos, forraje, fibras y combustible, y desempeña otras funciones que no son productivas. Este participa en la dimensión espacial del desarrollo de los asentamientos humanos: la construcción de viviendas e infraestructuras, instalaciones recreativas y de eliminación de residuos. El suelo es una parte esencial del paisaje,

conserva los restos del pasado y es un elemento importante del patrimonio cultural (AEMA, 2002). Sin embargo, es un recurso limitado y no renovable, y a diferencia de lo que ocurre con el aire y con el agua, el suelo no se recupera con facilidad de los daños que se le ocasionan (AEMA, 2002).

La importancia del suelo en sus diferentes usos y roles, lo hace más vulnerable a los daños y al agotamiento. El grado de tolerancia y recuperación del suelo de diferentes presiones, además de la capacidad de filtrar y degradar sustancias contaminantes, hace que los daños no se evidencien con facilidad y solo se empiezan a manifestar con claridad ya en fases avanzadas. El proceso de desertificación es un ejemplo claro de cómo la degradación afecta al suelo, producto de la interacción de diversos factores, entre ellos el clima y el uso inadecuado de los recursos bióticos, hídricos, edáficos y los impactos producidos por la actividad antrópica. Esta acumulación de situaciones posiblemente conlleva a la reducción progresiva de las propiedades del suelo para sustentar las diferentes actividades productivas y económicas, generando impactos sociales y políticos. La desertificación no se da únicamente en regiones del mundo que tengan un clima árido, sino que en la actualidad amenaza a amplias zonas del orbe, incluyendo a Colombia.

Hoy en día, las presiones que se ejercen sobre el recurso suelo van en aumento. A escala nacional y mundial están relacionadas con la mayor demanda para satisfacer diversas necesidades (AEMA, 2002). Según AEMA, a escala mundial, la necesidad de garantizar una seguridad alimentaria a una población en aumento exigirá más tierras destinadas a la agricultura o, más probablemente, una intensificación de la agricultura en los terrenos que se cultivan hoy. Por otra parte, el aumento de la población global, las actividades industriales, los cambios de conducta y de las pautas urbanas (suburbanización y expansión de las zonas urbanas), junto con la necesidad de aumentar la movilidad, exigirán también más suelo para usos irreversibles (AEMA, 2002). Estas demandas en conflicto, si no se gestionan de manera sostenible, acentuarán la degradación (prácticas agrícolas insostenibles, contaminación del suelo, impermeabilización, entre otros) (IGAC; IDEAM; MAVDT, 2010).

La degradación de los suelos en Colombia es el resultado de los procesos de erosión, remoción en masa y sedimentación causada por factores naturales y /o antrópico.

En Colombia hacia el fin de los años cuarenta se estimó que un 5% de los 30 millones de hectáreas de la zona Andina habían sido completamente destruidos por la erosión y eran inútiles para hacer agricultura. Según el IDEAM, el 48% de la extensión continental de Colombia en el año 2000 presentó algún grado de degradación en las formaciones superficiales y de rocas, ya por erosión, remoción en masa o sedimentación (García, 2013). En dicho territorio el 14.2% presenta una muy alta degradación, el 10.8% una alta degradación, el 10.8% una degradación moderada, el 8.9% una degradación baja y el 4.6% una baja degradación (García, 2013).

Según García, los departamentos que presentan una mayor degradación de suelos y tierras por erosión, remoción en masa y/o sedimentación en el territorio colombiano son: Atlántico (100%) y Guajira (93.8%), y en menor proporción Arauca (87.8%) y Casanare (94.8%) (García, 2013).

Según Méndez, et. al, en Colombia, por el mal uso o uso inadecuado de los suelos se han perdido cantidades significativas de él, dejando por fuera de la actividad económica el equivalente a 2.300.000 hectáreas, en una proporción de 1.8 toneladas por Km². Año-1 (Méndez, et .al, 1999).

1.3 Concepto de Degradación

Se han propuesto muchas definiciones y generado muchas discusiones acerca de la degradación de tierras como concepto, una de las más útiles por su simplicidad y concreción es la propuesta por García (2013), la tierra esta degradada cuando ha sufrido pérdida de cualidades intrínsecas o disminución en sus capacidades.

El problema de la degradación del suelo no es solo un problema de nuestros tiempos, pues ya desde la época de los romanos y griegos se encontraban registros donde se hacía mención al problema, Platón describió la destrucción del suelo como resultado de las deforestaciones. Sin embargo el problema en épocas anteriores no representaba un problema tan agudo pues la presión demográfica era mucho menor que la actual, además los sitios de explotación económica tenían fronteras más definidas y es así como las civilizaciones primitivas se establecían en las llanuras próximas a los ríos (suelos fértiles, con abundante agua y fáciles comunicaciones). La cada vez más creciente presión demográfica, ha llevado a la necesidad de explotación de suelos con pendientes cada vez

más altas y con tendencias a la degradación, situaciones que han llevado a hacer más difícil el reto de frenar la degradación del suelo.

La degradación de los suelos involucra todo proceso que implique pérdida o reducción de utilidad actual o potencial de sus capacidades productivas desde el punto de vista económico, de propiedades físicas, químicas, biológicas o de biodiversidad que no pueden ser reemplazados. Considera, entonces, la reducción, en rango o estatus, la degradación y/o pérdida de suelos, el cambio en la cantidad y diversidad en flora o fauna o la sustitución de una forma orgánica por otra forma orgánica menor (García, 2013).

García (2013) identifica como las principales causas del deterioro físico del suelo las siguientes:

- Una misma profundidad de labranza.
- Labranza bajo contenidos de humedad inapropiados.
- Pérdida de materia orgánica.
- Pérdida de estabilidad de los agregados.
- La velocidad de infiltración.
- Plasticidad y consistencia.
- Expansión y contracción.
- Óxidos de hierro y aluminio.

Amézquita (1998) plantea como los principales problemas físicos del suelo que condicionan la producción vegetal y que se relacionan con el laboreo del mismo son:

- Impedancia mecánica.
- Estrés de agua (déficit).
- Estrés de aireación (exceso de agua).
- Escorrentía y erosión.

A las anteriores problemáticas se les podría sumar el uso del suelo en contradicción del uso de acuerdo con su aptitud, así como alteraciones graves producidas por el mal manejo del riego.

En buena parte la degradación de los suelos es un fenómeno muy ligado al desconocimiento de las propiedades ambientales que juega el suelo en cualquier ecosistema, así como sus aptitudes y las técnicas con que debe ser explotado para hacer

de este un recurso sustentable. Este desconocimiento se ve reflejado entre otros muchos aspectos en la carencia de políticas de usos de los suelos y en la aplicación de prácticas que no contribuyen a su protección, y en cambio sí aceleran los procesos degradativos sin tomar en cuenta que este tipo de procesos es irreversible.

1.4 Propiedades Hidrodinámicas del Suelo

En una agricultura sostenible es fundamental mejorar la calidad de diagnóstico del funcionamiento hidráulico del suelo con la finalidad de elaborar mejores estrategias de manejo y encontrar indicadores que sean prácticos y que representen confiabilidad para el monitoreo y comportamiento general de los suelos, con un énfasis marcado en la dinámica del agua en el suelo. La medición de las propiedades físico - hídricas de un suelo, permite conocer los cambios ocurridos como consecuencia de las diferentes prácticas de manejo y cuantificar algunos índices de sostenibilidad del recurso.

Para tener en el suelo un recurso con condiciones adecuadas de funcionamiento para el desarrollo de los cultivos, este debería presentar una estructura estable capaz de permitirle a la planta la expresión de su potencial de crecimiento, sobre todo del sistema de raíces, sin impedimentos para la exploración del mayor volumen de suelo posible. Estas condiciones implican: condiciones de superficie con buena estabilidad de agregados para una correcta entrada y circulación de agua y aire, además de la transferencia de calor en el suelo; buena capacidad de almacenamiento de agua y libre movimiento de la solución agua más nutriente desde el suelo a la raíz y ausencia de limitaciones, que afecten el desarrollo radicular máximo de las plantas. Teniendo en cuenta los aspectos antes mencionados debe prestarse especial atención en dos elementos fundamentales: el agua y la fertilidad del suelo. En los sistemas de agricultura comercial, el comportamiento hidrodinámico de los suelos asociado a las variables climáticas y daños en la estructura del suelo condiciona una baja eficiencia en la captación y almacenamiento del agua, lo que impacta en el desarrollo de los cultivos reflejándose en la disminución de las cosechas.

1.4.1 Densidad Aparente

Es la densidad del suelo que se calcula teniendo en cuenta el espacio ocupado por los poros al cuantificar el volumen de la muestra de suelo, razón por la cual depende de la

organización que presente la fracción sólida del mismo y está afectada por su textura, su estructura, su contenido de materia orgánica, su humedad (en especial en suelos con materiales expansivos) y su grado de compactación, principalmente (Jaramillo, 2002).

Según la Soil Survey Staff, se toma como referencia para interpretar la densidad aparente del suelo, desde un punto de vista netamente práctico, el valor de 1.3 Mg.m⁻³, como densidad aparente promedio para los suelos minerales, diferentes a los Andisoles, cuyo valor es menor de 0.90 Mg.m⁻³ (Soil Survey Staff, (SSS), 1999,1998). Para los materiales orgánicos se propone un valor promedio de 0.224 Mg.m⁻³, aunque, dependiendo del grado de descomposición que ellos presenten, puede variar entre menor de 0.1 Mg.m⁻³, para materiales fibrosos, hasta mayor de 0.2 Mg.m⁻³, para materiales sápricos o más descompuestos (SSS, 1998).

Teniendo en cuenta la textura, Cortés y Malagón (1984) consideran como valores altos para la densidad aparente, aquellos que sean superiores a 1.3 Mg.m⁻³, en suelos con texturas finas; los mayores a 1.4 Mg.m⁻³, en suelos con texturas medias y los mayores a 1.6 Mg.m⁻³, en suelos con texturas gruesas como se muestra en la Tabla 1-1 (Jaramillo, 2002).

Tabla 1-1: Rangos de densidad aparente

<i>DENSIDAD APARENTE</i> (gr.cm ⁻³)	<i>INTERPRETACION</i>
1.05 - 1.1	BAJA
1.1 - 1.4	MEDIA
1.4 - 1.5	ALTA

FUENTE: Schargel y Delgado (1990).

1.4.2 Porosidad

La porosidad total del suelo viene representada por el porcentaje de poros existentes en el mismo con relación al volumen total. Esta característica depende la textura, estructura, el contenido de materia orgánica y de la actividad biológica del suelo. Cuanto más gruesos son los elementos de la textura mayores son los espacios entre ellos (Valenzuela y Torrente, 2013), de esta forma se pueden definir dos tipos de espacios porosos:

- Micro porosidad o Porosidad textural, está compuesta por el volumen de los poros más finos que tiene el suelo y que, en su mayor cantidad se encuentran en el interior de los peds.
- Macro porosidad o Porosidad estructural, es el volumen de poros grandes del suelo, los cuales se encuentran, en mayor proporción, ubicados entre los peds, en la Tabla 1-2, se observan los rangos para este parámetro.

Tabla 1-2: Rangos de macroporosidad

MACROPOROSIDAD (%)	INTERPRETACION
0 - 5	MUY BAJA
5--10	BAJA
10--15	MEDIA
15 -25	ALTA

FUENTE: Adaptado de Ipaz (2011)

La caracterización antes mencionada cobra valor, cuando se tiene en cuenta la función específica que cumple a cada tipo de porosidad, ya que los macro poros son los responsables de la circulación del agua, sobre todo cuando está en exceso, y del aire en el suelo, en tanto que los micro poros son los encargados de almacenar agua dentro del suelo.

Antes que conocer la porosidad total del suelo, conocer la distribución de los poros de diferentes tamaños, se hace más importante y practico, debido a que, la proporción en que se encuentren los diferentes tamaños es la que controla las relaciones fundamentales entre las fases sólida - líquida - gaseosa, influyendo en cualidades hidrodinámicas como drenaje, infiltración, almacenamiento de agua, aireación, temperatura, etc.

Según Valenzuela y Torrente, una correcta distribución de los fluidos del suelo requiere una buena distribución entre macro y micro porosidad, que suele estimarse en volúmenes semejantes, de modo que cada una ocupe entre un 40% y un 60% del total, como se ve en la Tabla 1-3 (Valenzuela y Torrente, 2013).

Tabla 1-3: Clasificación porosidad del suelo

<i>POROSIDAD TOTAL (%)</i>	<i>CALIFICACION</i>
> 70	EXCESIVA
55 -70	EXCELENTE
50 -55	SATISFACTORIA
40 - 50	BAJA
< 50	MUY BAJA

FUENTE: Kaurichev, (1984)

Según Valenzuela y Torrente, las desviaciones hacia la micro porosidad generan un ambiente asfixiante y reductor con escaso suministro de oxígeno a las raíces. Lo contrario supone una buena aireación, pero una retención de agua insuficiente. Es más importante esta distribución que el valor total de porosidad del suelo (Valenzuela y Torrente, 2013).

También, es importante analizar, como en el caso de la densidad aparente, la distribución de la porosidad a través del perfil, para identificar posibles horizontes limitantes del drenaje, de la aireación, del aporte de humedad a la planta y/o del crecimiento de las raíces.

Al analizar la distribución de la porosidad, debe tenerse en cuenta que los excesos tienen sus problemas ya que por ejemplo si predominan los macro poros, se va a presentar un drenaje y aireación excesivos y una capacidad de almacenamiento de agua muy baja, en tanto que, si predomina la micro porosidad, se presentarán problemas de drenaje y aireación y aumentará la posibilidad de compactación del suelo y de producción de compuestos tóxicos para la planta por efecto de las condiciones reductoras que pueden generarse.

La distribución de la porosidad del suelo es una característica que debe evaluarse con periodicidad, sobre todo en suelos sometidos a usos intensivos. Los cambios en esta propiedad pueden ser indicativos de deterioro físico del suelo, como lo muestran los resultados presentados por García (1991), en suelos franco limosos del Valle del Sinú, sometidos a laboreo con discos durante 25 años.

1.4.3 Contenido de Humedad del Suelo

La cantidad de agua que posea el suelo es una de sus características más específicas y está determinada, fundamentalmente, por su textura, su contenido de materia orgánica, la composición de sus fracciones mineral y orgánica y el arreglo que presente el medio físico edáfico, por el aporte que se le haga natural (lluvia) o artificialmente (riego) de ella, así como por el consumo causado por la evapotranspiración (Jaramillo, 2002).

Con respecto a la influencia que tiene el contenido de coloides (arcilla y humus) sobre el contenido de humedad del suelo, se observa que la cantidad de agua en él aumenta linealmente al aumentar su contenido de arcilla y/o de materia orgánica, conservándose constantes las fuerzas de retención (Jaramillo, 2002).

1.4.4 Retención de la Humedad del Suelo

El agua del suelo se presenta adherida a las partículas sólidas de éste en forma de películas y no está libre en él, a no ser que se encuentre saturado; lo anterior implica que sobre el agua del suelo actúan una serie de fuerzas, de magnitud y dirección variadas, que definen el estado energético del agua del suelo en un determinado punto de él (Jaramillo, 2002).

El agua es atraída por las partículas del suelo y se conoce esta atracción como fuerza matricial. La energía del agua, cuando esta retenida por el suelo, implica efectuar un trabajo para sustraerla de su ambiente, este ambiente es la matriz del suelo (Valenzuela y Torrente, 2013). En tanto más seco se encuentre el suelo, mayor será el trabajo que tendrá que ejercer la planta para extraer el agua desde el suelo (Valenzuela y Torrente, 2013). Es interesante entonces, conocer la energía con que el agua es retenida por el suelo (Valenzuela y Torrente, 2013). Los suelos tienen diferente capacidad de retención de agua en función de sus características físico-químicas. Los factores que afectan la retención del agua en el suelo son: estructura, porosidad, profundidad, topografía, inclinación, cantidad de solutos, espesor de la película del agua e histéresis del agua del suelo (Valenzuela y Torrente, 2013).

El suelo es un reservorio de agua; sin embargo, existen escapes. Cuando se añade demasiada agua, el exceso drena hacia las capas más profundas del suelo (Valenzuela y

Torrente, 2013). La fuerza de atracción entre los átomos de hidrogeno del agua y átomos de oxigeno de las superficies minerales del suelo o de otras moléculas de agua sostienen el agua en el suelo contra la fuerza de gravedad (Valenzuela y Torrente, 2013). La atracción de átomos de hidrogeno del agua para átomos de oxigeno de minerales es llamada fuerza adhesiva (Valenzuela y Torrente, 2013). La fuerza de atracción de átomo de hidrogeno del agua para átomos de oxigeno de otras moléculas de agua es llamada fuerza cohesiva (Valenzuela y Torrente, 2013). Cuando estas fuerzas combinadas ocurren en gran número, se mantiene una película de agua de considerable grosor sobre la superficie de las partículas del suelo (Valenzuela y Torrente, 2013). Debido a que las fuerzas que retienen el agua en el suelo son fuerzas de atracción superficial, entre mayor sea la superficie de las partículas coloidales del suelo (arcilla, materia orgánica), mayor es la cantidad de agua adsorbida (Valenzuela y Torrente, 2013). Existe diferente nomenclatura para denominar la fuerza con que es retenida el agua (o la fuerza requerida para extraer el agua) del suelo. Las principales denominaciones son: succión, tensión, potencial de humedad y el más usado, potencial matricial. Este es un número negativo, debido a que se requiere de un trabajo para remover el agua de las partículas del suelo (Valenzuela y Torrente, 2013).

1.4.5 Constantes de Humedad del Suelo

De acuerdo con las fuerzas de retención que están actuando sobre la humedad del suelo, se han definido, más o menos arbitrariamente, ciertos estados y límites de humedad de uso corriente en edafología (Jaramillo, 2002). Los que se usan más frecuentemente son los siguientes:

- Coeficiente higroscópico: contenido de humedad que retiene el suelo cuando se seca al aire; esta humedad es retenida a una tensión de -30 atm, aproximadamente (Jaramillo, 2002).
- Punto de marchitez permanente: contenido de humedad del suelo al cual la planta se marchita irreversiblemente; el agua del suelo en este punto, está retenida a -15 atm, aproximadamente (Jaramillo, 2002).
- Capacidad de campo: es el contenido de humedad con que queda el suelo, luego de que sus macro poros han drenado completamente; se llega a esta condición de humedad luego de dejar drenar el suelo saturado, entre 48 y 72 horas; el agua en esta

condición está retenida a tensiones comprendidas entre -0.1 y -0.3 atm (Jaramillo, 2002).

- Agua aprovechable: Es la humedad que presenta el suelo retenida entre el punto de marchitez permanente y la capacidad de campo (Jaramillo, 2002).

Es de anotarse que las constantes de humedad definidas anteriormente son arbitrarias y que no son aplicables estrictamente, a todos los cultivos ni a todos los suelos, puesto que hay factores de tipo ambiental y genético que intervienen en la eficiencia de la planta para utilizar el agua del suelo. En la Tabla 1- 4, se presentan algunos rangos de valores.

Tabla 1-4: Clasificación valores de LAA

LAA (cm.m ⁻¹)	INTERPRETACION
0 - 5	BAJA
5 - 10	MEDIA
10 - 15	BAJA
15 - 20	ALTA
>20	MUY ALTA

FUENTE: SCCS (1990).

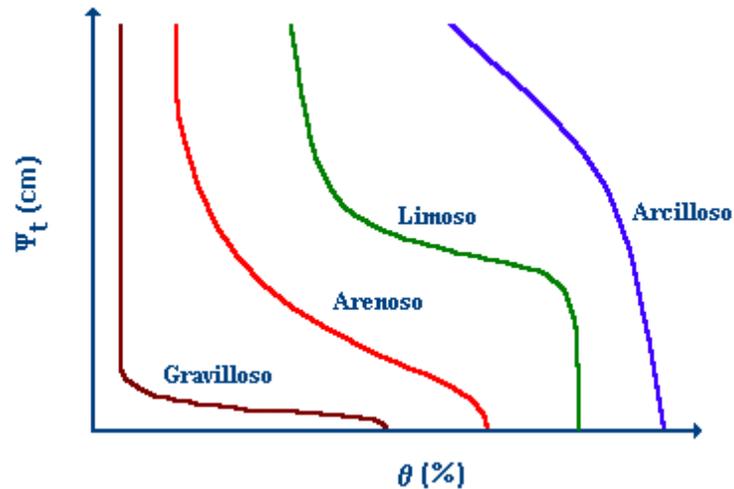
1.4.6 La Curva de Retención de Humedad del Suelo

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 (Jaramillo, 2002). Esta relación tiene una dependencia muy grande de la textura del suelo, como puede verse en las gráficas teóricas que se presentan en la Figura 1-1. Es una herramienta indispensable en el manejo de riegos y sirve para establecer controles en el campo, utilizando, generalmente, los tensiómetros (Jaramillo, 2002).

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 atm, por ejemplo) y cuando se llega al equilibrio, se determina el contenido de humedad que presenta la muestra por el método gravimétrico (Jaramillo, 2002).

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).

Figura 1-1: Comportamiento teórico de la tensión de humedad del suelo según textura



FUENTE: Stephens, (1996).

1.4.7 Movimiento del Agua en el Suelo

Cuando el agua del suelo está en equilibrio, el potencial total en el sistema es constante y, por lo tanto, no hay ningún movimiento de ella en el suelo. El movimiento de agua en el suelo se da cuando las condiciones de equilibrio se rompen y se generan diferencias de potencial entre los diferentes puntos del sistema (Jaramillo, 2002).

Cuando se presenta flujo de agua en el suelo, el agua se desplaza obedeciendo a gradientes de potencial total en el mismo: Ella se desplaza desde donde está retenida con un potencial menos negativo (mayor potencial) hacia donde se presenta un potencial más negativo (menor potencial); cuando el Δt en los diferentes puntos del suelo se iguala en todos ellos, se suspende el movimiento de agua (Jaramillo, 2002). Por ejemplo, si un punto A está ubicado a 70 cm de profundidad en el suelo y tiene una cabeza hidráulica de -0.55 m y otro punto B, a 120 cm de profundidad tiene una cabeza hidráulica de -0.65 m, el agua

en ese suelo se moverá desde el punto A hacia el punto B, es decir, en el suelo habrá un flujo de agua descendente (Jaramillo, 2002).

El movimiento del agua en el suelo se rige por distintas leyes, según la importancia relativa de las diferentes fuerzas en presencia de la humedad del suelo (Valenzuela y Torrente, 2013). En un primer caso, cuando el contenido de humedad en el suelo es mayor a la capacidad de retención, hasta un nivel de saturación o superior, el movimiento del agua se rige por la gravedad. En esta situación la permeabilidad es la propiedad que define la mayor o menor facilidad con la cual se realiza este movimiento (Valenzuela y Torrente, 2013). En un segundo caso, cuando el contenido de humedad es inferior a la capacidad de retención, el movimiento del agua se rige por difusión capilar hasta llegar al contenido de humedad que señala el punto de marchitez y, pasando este, el desplazamiento del agua está regido por la evaporación (Valenzuela y Torrente, 2013). En este caso domina el potencial de fuerzas capilares sobre las restantes. La velocidad de circulación dependerá de los límites de humedad del suelo. Si la humedad es uniforme en todos los puntos del suelo, no hay movimiento (Valenzuela y Torrente, 2013).

1.4.8 Infiltración

Es la propiedad que evalúa la velocidad de entrada del agua al suelo. Es un parámetro crítico cuando se están haciendo diseños de riego, pues ella define cuánto tiempo debe permanecer el agua sobre la superficie del suelo para que haya un adecuado humedecimiento, si se trata de riego superficial, o limita los caudales de aplicación en sistemas de aspersión (Jaramillo, 2002).

La velocidad con la cual pasa el agua del exterior al interior del suelo depende de varios factores como lo menciona (Jaramillo, 2002):

- El contenido de humedad que presente el suelo al momento de hacer la evaluación: A mayor contenido de humedad, menor será la velocidad de infiltración.
- La permeabilidad del suelo: La calidad del arreglo físico del suelo facilita o dificulta el movimiento de agua dentro de él, aumentando o disminuyendo, respectivamente, la velocidad con la cual el suelo puede recibir nuevas cantidades de agua.
- La cantidad y tipo de coloides: Si en el suelo hay contenidos considerables de coloides expansibles, a medida que el suelo se va humedeciendo se va reduciendo el tamaño

de los poros, aumentando la fricción del agua en ellos y por tanto aumentando la dificultad para su movimiento, lo cual reduce, a su vez, la infiltración.

- El tipo de poros: Si en el suelo predominan los poros finos, la infiltración será baja; éste tipo de poros puede estar relacionado con texturas finas y/o poco desarrollo estructural, así como con problemas de compactación.
- La homogeneidad del perfil del suelo: En suelos de perfil homogéneo se presenta una alta continuidad en el espacio poroso, la cual facilita el movimiento del agua y su infiltración; cuando hay contrastes texturales y estructurales en el interior del suelo, éstos pueden generar interrupciones en los poros, o reducciones drásticas en el tamaño de ellos que desaceleran el flujo del agua y la infiltración.
- Las condiciones superficiales del suelo: La presencia de sellamiento y/o encostramiento superficial del suelo reduce su infiltración.
- La presencia de materiales hidrofóbicos en el suelo: La velocidad de infiltración se ve menguada en la medida en que se presenten en el suelo materiales repelentes al agua, como lo han confirmado varios investigadores (Ritsema et al ,1996).
- El tiempo que dure el suministro de agua al suelo, sea por riego o por lluvia.
En la Tabla 1-5, se ilustran algunos de los rangos mencionados.

Tabla 1-5: Valores rangos de infiltración

<i>INFILTRACION (cm.h⁻¹)</i>	<i>INTERPRETACION</i>
MUY LENTA	< 0.1
LENTA	0.1—0.5
MODERADAMENTE LENTA	0.5—2.0
MODERADA	2.0—6.3
MODERADAMENTE RAPIDA	6.3—12.7
RAPIDA	12.7—25.4
MUY RAPIDA	> 25.4

FUENTE: IGAC, (1990)

1.4.9 La 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; por su definición, es una cualidad que se relaciona estrechamente con el drenaje del suelo (Jaramillo, 2002).

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 (Hanks y Ashcroft, 1980). 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 (Jaramillo, 2002).

Para fines de interpretación de los valores de Ksat que se obtengan, el Soil Survey Division Staff (SSDS, 1993) recomienda el uso de los límites críticos que se presentan en la Tabla 1-6. Cabe recordar que como la infiltración básica del suelo se asimila a la Ksat, la información de la tabla mencionada también puede utilizarse para interpretar dicha infiltración.

Tabla 1-6: Rangos de valores de K saturado

Ks (cm.h⁻¹)	INTERPRETACION
< 0.1	MUY LENTA
0.1 - 0.5	LENTA
0.5 - 1.6	MOD. LENTA
1.6 - 5	MODERADA
5.0 - 12.0	MOD. RAPIDA
12.0-18.0	RAPIDA
> 18	MUY RAPIDA

FUENTE: IGAC, (1990)

1.4.10 Estabilidad Estructural

Las partículas sólidas del suelo se unen entre sí de diversas formas, generando unidades de mayor tamaño llamadas agregados, unidades estructurales o peds. El arreglo que se produce con estos sólidos se denomina estructura del suelo (Jaramillo, 2002).

Aunque la formación de la estructura es un proceso fundamental en el suelo, su persistencia frente a agentes perturbadores del medio es indispensable para tener un

medio físico edáfico adecuado; la estabilidad estructural es la que define en gran medida, la intensidad y el tipo de uso y manejo y, desde el punto de vista del manejo intensivo del suelo, ésta es una de las propiedades que mejor deben conocerse, ya que es la que más determina su resistencia al deterioro y a la erosión (Jaramillo, 2002).

Los principales agentes que perturban la estructura son las gotas de lluvia, la mecanización, la presencia de ciertos cationes como el sodio, las condiciones inadecuadas de humedad y el déficit de coloides en el suelo, entre otros (Jaramillo, 2002).

La estabilidad estructural de un suelo es la resistencia de los granos a disgregarse en condiciones de humedad (Valenzuela y Torrente, 2013). Define el estado de agregación de las partículas, componentes minerales u orgánicas del suelo. Depende de la disposición de sus partículas y de la adhesión de las partículas menores para formar otras mayores o agregados (Valenzuela y Torrente, 2013).

Para cuantificar la estabilidad estructural del suelo se han diseñado varios métodos, orientados principalmente a medir la resistencia de los agregados frente a la acción del agua; de ellos, el más confiable es el que utiliza simuladores de lluvia, aunque por las dificultades de manejo que tiene no ha sido estandarizado para trabajos de rutina; para tener una medida aproximada de dicha resistencia se utilizan métodos de tamizado en húmedo de una muestra de suelo como el de Yoder y el de Henin (Jaramillo, 2002).

Como lo menciona (Jaramillo, 2002), aunque no hay criterios unificados en torno a los valores óptimos de agregación del suelo, algunos autores han encontrado valores relacionados con algunas cualidades del suelo que pueden tomarse como guía de evaluación:

- Porcentajes altos de agregados menores de 0.5 mm, aumentan la susceptibilidad a la erosión del suelo (Cortés y Malagón, 1984).
- El DGM caracteriza mejor el diámetro dominante en los agregados del suelo que el DPM y, generalmente, éste es mayor que el diámetro geométrico medio.
- El índice de agregación (DPM), determinado por el método de Yoder, cuando es menor de 0.5 mm, indica mala estructuración.
- Cuando el contenido de agregados mayores a 2 mm es muy alto, alrededor de 80% o más, se puede estar en presencia de un suelo cementado.

- Los agregados menores a 0.25 mm no contribuyen a la aireación del suelo por lo que su contenido debe ser bajo para que haya un buen suministro de oxígeno a las raíces.
- Agronómicamente, los tamaños de agregados más deseables son aquellos que están alrededor de 3 mm de diámetro.

En la interpretación de los índices de estabilidad estructural del suelo hay que tener cuidado con la presencia de gravillas, gravas y/o concreciones en él, pues si no se tuvo la precaución de eliminarlas para el análisis, van a distorsionar los resultados, presentando un suelo con su estabilidad estructural sobreestimada (Jaramillo, 2002).

El efecto de sobrevalorar la estabilidad estructural del suelo, por la presencia de concreciones, lo advirtieron Ordóñez et al (1992) en Ultisoles y en Inceptisoles del Guaviare, amazonia colombiana, al encontrar que el tamaño y estabilidad de los agregados en esos suelos aumentaban considerablemente cuando se talaba el bosque natural y se plantaban cultivos o pastos (Jaramillo, 2002). La implantación de estos usos reducía la humedad en el suelo, haciendo que el hierro que estaba disuelto fuera precipitando y endureciéndose, cementando partículas de suelo y dándole a éste una aparente mayor estabilidad estructural (Jaramillo, 2002). En la Tabla 1-7 se ilustran los valores de estabilidad de agregados.

Tabla 1-7: Interpretación DPM

<i>DPM (mm)</i>	<i>INTERPRETACION</i>
< 0.5	INESTABLE
0.5 - 1.5	LIGERAMENTE ESTABLE
1.5 - 3.0	MODERADAMENTE ESTABLE
3.0 - 5.0	ESTABLE
> 5.0	MUY ESTABLE

FUENTE: IGAC, (1990)

1.5 Variabilidad Espacial de los Suelos

La variabilidad de las propiedades del suelo es una condición inherente al mismo, debido a que en su génesis intervienen varios procesos diferentes, controlados por los factores de formación que interactúan a una escala de tiempo y espacio (Torrente, 2003). Los procesos

que operan sobre grandes distancias (por ejemplo, el clima) o sobre largos periodos de tiempo (como la meteorización) son modificados por otros procesos que operan de manera más local, como la erosión y la deposición de material parental (Trangmar et al., 1985). De igual manera, Chien et al., (1997) consideran que estas fuentes naturales de variación son modificadas por factores extrínsecos como las prácticas de manejo del suelo.

La variabilidad depende de la propiedad que se analice, así se encuentra variación en las propiedades químicas que en las físicas (Torrente, 2003); además, hay menor variabilidad en las propiedades del suelo en su condición natural que cuando es sometido a uso (Ovalles, 1992).

Naturaleza de la variabilidad. La variación de las propiedades del suelo contiene dos componentes, teniendo en cuenta la fuente de error que la produce (Torrente, 2003). La variabilidad sistemática, cuya fuente de variación puede ser atribuida a causas conocidas, es entendible y predecible (Upchurch y Edmonds, 1992). Wilding y Dress, citados por Trangmar et al., (1985), consideran que esta variabilidad está representada por los cambios de las propiedades del suelo y que se pueden entender y explicar en términos de sus factores y procesos de formación a la escala de observación usada. La variación sistemática se puede originar por la diferencia en la topografía, litología, clima, actividad biológica y la edad de los suelos en estudios regionales, o debido a las diferencias en los micrositos o composición físico-química cuando los suelos son observados a un nivel más detallado (Trangmar et al., 1985).

Cuando la variabilidad no se puede relacionar con causas conocidas, se define como variabilidad aleatoria (Upchurch y Edmonds, 1992) y se estima que, en los suelos, en general, la variabilidad sistemática es mayor que la variabilidad aleatoria, aunque se reconoce que la relación entre los dos tipos de variabilidad puede tener una alta dependencia de la escala de trabajo (Upchurch y Edmonds, 1992).

1.6 Sistemas de Información Geográfica

En la actualidad existen muchas definiciones de sistemas de información geográfica (SIG), que dependen del país, escuela y área de estudio, y no se puede decir que alguna sobresale sobre otra, sino simplemente que éstas responden a diferentes orientaciones

según la perspectiva, circunstancia, aplicación o el punto de vista de los autores involucrados. Por lo anterior las (Naciones Unidas, 2000), definen un sistema de información geográfica (SIG) como una herramienta informática que sirve para ingresar, almacenar, gestionar, recuperar, actualizar, analizar y producir información y los datos que contiene están relacionados con las características de los lugares o zonas geográficas (Naciones Unidas, 2000). En otras palabras, un SIG nos permite conocer la ubicación de ciertas cosas o saber qué cosas se encuentran en cierta ubicación. Es importante recalcar que la aplicabilidad de los sistemas de información geográfica radica en que los diferentes procesos sobre la tierra no son independientes entre sí y los procesos pueden plantearse como sistemas que permiten estudiarse en forma interdisciplinaria. De esta manera, Baquero (2011) plantea que “un Sistema de Información Geográfica deberá cumplir con las propiedades de un sistema y las funciones de un Sistema de Información”, lo que lo hace diferente a este es que sus datos son entidades espaciales georreferenciadas, es decir datos geográficos que poseen unas coordenadas y unos atributos propios del lugar sobre el cual se está registrando cierta información.

Debido a la capacidad de los SIG de integrar información de diversas fuentes, permitiendo una consulta y análisis de forma rápida y directa de la información obtenida, los SIG se han convertido en herramientas utilizadas para distintos sectores de actividad públicos o privados ya sea en el campo investigativo, industrial, de conservación y protección y demás sectores que involucran distintas variables en un mismo análisis.

Ager Ingenieros (2003), registra que los campos de mayor aplicación de los SIG son aquellos en los cuales una variable principal de estudio depende de diferentes factores que se deben agrupar de tal manera que se logre obtener un sistema que permita la toma de decisiones teniendo en cuenta las diferentes implicaciones en el medio por dichos factores tales como:

Planificación hidrológica: Realizando gestión del agua en comunidades de regantes, distribución de agua urbana y agrícola, modelización hidrológica, análisis de riesgos y estudios de cuencas fluviales.

Agricultura: Aplicada en la distribución y gestión territorial mediante coberturas digitales del parcelario, aplicación de fertilizantes, explotaciones agrarias y agricultura de precisión.

Protección del medio ambiente: En la creación de mapas temáticos del medio natural y seguimiento de su estado de conservación y modelización de variables ambientales.

Geografía empresarial: utilizados para la investigación de mercados y determinación de la localización óptima de nuevas empresas mediante análisis de la distribución y características de la población y geomarketing.

Estudios sociodemográficos determinación de la estructura de la población de un barrio para prever la evolución de las necesidades de ciertos equipamientos, determinación de zonas susceptibles y estudios orientados a fines electorales.

Estructuras de datos en los SIG

A pesar de la heterogeneidad de la información que puede almacenarse en un SIG, existen métodos comunes de representar la información espacial en una base de datos de SIG, los cuales son modelo vector y modelo raster.

Estructura vector. De acuerdo con las Naciones Unidas (2000) los sistemas de SIG en forma de vectores representan características del mundo real utilizando un conjunto de primitivas geométricas: puntos, líneas y polígonos lo cual conlleva a que la estructura vector sea más compacta, esté más fácilmente ligada a la topología y de ello resulta una eficiencia mayor de las operaciones que requieren información topológica, como por ejemplo análisis de redes (Baquero, 2011).

Estructura raster. Los programas de SIG en forma de cuadrícula dividen el espacio en un conjunto regular de líneas y columnas. Cada casilla de este conjunto o retícula a veces se denomina pixel, que significa elemento de imagen y pone de manifiesto el origen de este modelo de datos en la tele observación o el procesamiento de imágenes. Baquero (2011) plantea que los objetos se describen con una o varias celdas encadenadas que no se superponen ni dejan espacios vacíos. La geometría se puede describir por medio de celdas vecinas que tengan el mismo atributo. Cada celda se define con una fila, una columna y un valor que representa el atributo, así el aspecto temático del terreno está ligado directamente a la posición del objeto, por ello la estructura raster se recomienda para zonas extensas, para escalas pequeñas, para desarrollar análisis complejos o para procesar imágenes.

Evaluación estadística de la variación. Con la estadística clásica se ha analizado la variación aleatoria del suelo, asumiendo normalidad, aleatoriedad, igual varianza e independencia de las observaciones. Una variable con dependencia espacial, definida por Jaramillo (1997), se refiere al valor que toma dicha variable en un sitio dependiendo de la distancia y/o la dirección a la cual se ubica de otro sitio vecino; en este caso, el principio de independencia de las medidas no se presenta y los procedimientos de la estadística clásica no son adecuados para su estudio.

Journel y Huijbregts (1978) llaman a estas variables que presentan dependencia espacial “variables regionalizadas”; estas son funciones que describen un fenómeno natural geográficamente distribuido y tienen algún grado de auto correlación. Para el estudio de este tipo de variables se tiene un grupo de herramientas estadísticas conocido con el nombre de “Geo estadística”.

1.7 Geo estadística

La geo estadística está basada en la teoría de las variables regionalizadas, cuyos conceptos fueron desarrollados por Krige. Posteriormente, Matheron generalizó y extendió estos conceptos dentro de la Teoría de las variables regionalizadas (Trangmar et al,1985). Básicamente, esta teoría propone que si una variable cambia en el espacio de una manera continua, esta puede ser descrita por alguna función matemática (Upchurch y Edmonds, 1992).

En la naturaleza, las variables físicas, químicas y biológicas no presentan un comportamiento homogéneo distribuido en el espacio en que se encuentran, lo que no significa que no se presente un patrón de distribución. Al contrario, en la mayoría de los casos, existe una continuidad espacial entre las diferentes localizaciones. García (2004) plantea que la geo estadística comprende a un conjunto de herramientas y técnicas que sirven para analizar y predecir los valores de una variable que se muestra distribuida en el espacio o en el tiempo de una forma continua, es decir, la geo estadística es el estudio estadístico de datos para analizar la variabilidad espacial de una propiedad o característica espacial en un entorno.

El análisis de datos que involucren un método geo estadístico conlleva a tres etapas de análisis, análisis exploratorio de datos, análisis estructural y predicciones en el

comportamiento de los datos obtenidos, sumando a lo anterior herramientas de análisis informativo, métodos de interpolación y demás análisis estadísticos, permiten realizar un análisis de variabilidad espacial logrando pasar de una heterogeneidad espacial a una homogeneidad sectorial.

1.8 Métodos de Interpolación Determinísticos

Interpolación IDW

Es un método matemático de interpolación que usa una función inversa de la distancia, parte del supuesto que las cosas que están más cerca son más parecidas, por lo tanto tienen más peso e influencia sobre el punto a estimar (Cañada et al. Citado por Murillo et al, 2012). Matemáticamente se expresa como:

$$Z(S_o) = \sum_{i=1}^N \lambda_i * Z(S_i)$$

Donde $Z(S_o)$ es el valor a predecir, N es el número de muestras alrededor del punto a predecir, λ_i son los pesos asignados a cada punto vecino y $Z(S_i)$ son los valores medidos. Los pesos de los puntos vecinos están dados por

$$\lambda_i = \frac{[d_{io}]^{-p}}{\sum_{i=1}^N [d_{io}]^{-p}}$$

Donde d es la distancia entre el lugar de predicción (S_o) y el lugar muestral (S_i); P es un factor de reducción de peso, cuyo valor se encuentra minimizando el error cuadrático medio o error de predicción.

Interpolación Spline

En el análisis numérico, un Spline es una curva diferenciable definida regularmente por polinomios. En los requerimientos de interpolación, este proceso es utilizado con regularidad porque permite tener resultados similares requiriendo solamente el uso de polinomios de bajo grado, evitando oscilaciones indeseables que se presentan en la mayoría de las aplicaciones al interpolar mediante polinomios de grado elevado. Los splines tienen gran utilidad para el ajuste de curvas ya que presentan la posibilidad de aproximar formas complicadas, también son de gran utilidad pues por su simplicidad de

representación y cálculo, representan de muy buena manera curvas informáticas particularmente en el campo de los gráficos.

Radial Basis Function

Las funciones de base radial (RBF) están compuestas por un grupo de técnicas de interpolación exacta, esta particularidad se da por que la superficie debe pasar por cada valor de muestra medido, dentro de las técnicas más usadas encontramos cinco funciones de base diferentes:

- Spline de lámina delgada
- Spline con tensión
- Spline regularizado completamente
- Función multicuádrica
- Función multicuádrica inversa

Cada función de base tiene una forma diferente y genera una superficie de interpolación distinta. Los métodos RBF son un caso especial de splines. Las RBF son conceptualmente similares a ajustar una membrana de goma a través de los valores de muestra medidos minimizando a la vez la curvatura total de la superficie. La función de base seleccionada determina cómo se ajustará la membrana de goma entre los valores.

Los métodos RBF, en su condición de interpoladores exactos, presentan diferencias frente a los interpoladores polinómicos globales y locales, que son interpoladores inexactos que no requieren que la superficie pase por los puntos medidos. Los RBF tienen una ventaja clara frente a otro tipo de interpoladores exactos como el método IDW, y es que el interpolador IDW nunca predice valores por encima del valor máximo medido o por debajo del valor mínimo medido, mientras que las RBF pueden predecir valores por encima del valor máximo medido y por debajo del mínimo. Los parámetros óptimos se determinan usando la validación cruzada de un modo similar al descrito para el método IDW y la interpolación polinómica local.

Cuándo se deben usar las funciones de base radial

Las RBF se usan para generar superficies suaves a partir de un gran número de puntos de datos. Las funciones producen buenos resultados para superficies con una variación

suave como la elevación. Sin embargo, las técnicas no son adecuadas cuando se producen cambios grandes de los valores de la superficie en distancias cortas o cuando se sospecha que los datos de la muestra son proclives a los errores de medición o a las incertidumbres (Manual ArcGIS for Desktop, 2015).

1.9 Métodos de Interpolación Geo estadísticos

Interpolación Kriging

Villatoro et al (2008) en su estudio definen el Kriging como un estimador lineal insesgado que busca generar superficies continuas a partir de puntos discretos basado en auto correlación espacial de las variables. Asume que la media, aunque desconocida, es constante y que las variables son estacionarias y no tienen tendencias. Permite transformación de los datos, eliminación de tendencias y proporciona medidas de error (Villatoro et al, 2008).

Para determinar la auto correlación se usan semivariogramas y vecindades obtenidos a partir de un análisis exploratorio de los datos. El semivariograma permite a partir de la covarianza entre los puntos, representar la variabilidad de los mismos y su dependencia en función de la distancia y la dirección. Se calcula a partir de

$$Z(S) = \mu(S) + \varepsilon(S)$$

Donde $Z(S)$ es la variable de interés, $\mu(S)$ es una constante desconocida, $\varepsilon(S)$ son errores aleatorios de estimación y S son coordenadas espaciales (x,y) . La predicción de un punto en el método de interpolación Kriging está dada por

$$\hat{Z}(S_0) = \sum_{i=1}^N [\lambda_i Z(S_i)]$$

Donde $\hat{Z}(S_0)$ es el valor predicho, λ_i es el peso de cada valor observado y $Z(S_i)$ es el valor medido en un lugar.

Ordinary Kriging

Suponga que se hacen mediciones de la variable de interés Z en los puntos s_i ; $i = 1; \dots; n$, de la región de estudio, es decir, se tienen realizaciones de las variables $Z(s_1); \dots; Z(s_n)$; y

se desea predecir $Z(s_0)$; en el punto s_0 donde no hubo medición. Bajo las consideraciones anteriores, la metodología kriging ordinario propone que el valor de la variable en el sitio no muestreado puede predecirse como una combinación lineal de las n variables aleatorias, como se muestra a continuación:

$$Z^*(s_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(s_i)$$

En donde los λ_i representan los pesos o ponderaciones de los valores de las variables en los sitios muestreados. Dichos pesos se calculan en función de la distancia entre los puntos muestreados y el punto donde se va a llevar a cabo la correspondiente predicción (Giraldo, 2009). La suma de los pesos debe ser igual a uno para que la esperanza del predictor sea igual a la esperanza de la variable. Esto último se reconoce como el requisito de insesgamiento (Giraldo, 2009).

Se dice que $Z^*(s_0)$ es el mejor predictor lineal en este caso, porque los pesos se obtienen de tal manera que minimicen la varianza del error de predicción sujeto a que se cumpla el requisito de insesgamiento, es decir, que se minimice la expresión:

$$V(Z^*(s_0) - Z(s_0)) \quad \text{sujeto a} \quad \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$$

Y la aplicación del método de los multiplicadores de Lagrange como técnica de optimización en conjunto con la determinación de la matriz de covarianzas a partir de la estructura de auto correlación espacial nos permite la determinación de los pesos λ_i óptimos.

Kriging lineal con valores esperados conocidos: Kriging Simple.

Sistema de ecuaciones:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^n \lambda_j \sigma_{ij} = \sigma_{i0}, \quad i=1, \dots, n \\ \lambda_{0=m(x_0)} = \sum_{i=1}^n \lambda_i m(x_i) \end{array} \right.$$

Estimador:

$$Z_0^* = \lambda_0 + \sum_{i=1}^n (\lambda_i) (x_i) -$$

Varianza de la estimación:

$$\sigma_{K_s}^2 = \sigma_{00}' - \sum_{i=1}^n \lambda_i \sigma_{i0}'$$

Donde

$$m(x_i) = E[Z(x_i)]$$

$$\sigma_{ij}' = \sigma_{ij} - m(x_i)m(x_j)$$

Es el valor esperado en el punto x_i

Covarianza centrada

Requisitos:

- Conocer $n + 1$ valores esperados $m(x_i) = E[Z(x_i)] \quad \forall i = 0, \dots, n$ de la función aleatoria $Z(x)$.
- Conocer la función de covarianzas σ_{ij} de la función aleatoria $Z(x)$ (Díaz, 2002).

Universal Kriging

Para el kriging ordinario, es indispensable que la variable además de ser regionalizada cumpla con el supuesto de estacionariedad (al menos la estacionariedad débil).

En muchos casos la variable no satisface estas condiciones y se caracteriza por exhibir algún tipo de tendencia (Samper y Carrera, 1990). Por ejemplo, en hidrología los niveles piezométricos de un acuífero pueden mostrar una pendiente global en la dirección del flujo (Samper y Carrera, 1990). Así las cosas, defínase ahora $Z(s)$ como,

$$Z(s) = m(s) + \varepsilon(s),$$

Siendo $m(s)$ la función determinística que describe la tendencia, más una componente estocástica estacionaria de media cero. Esto es:

$$E(\varepsilon(s)) = 0, \quad V(\varepsilon(s)) = \sigma^2$$

Y en consecuencia,

$$E(Z(s)) = m(s)$$

La tendencia puede expresarse como

$$m(s) = \sum_{l=1}^p a_l f_l(s)$$

Donde las funciones $f_l(s)$ son conocidas y p es el número de términos empleados para ajustar $m(s)$: El predictor kriging universal se define como:

$$Z_0^*(s_0) = (x + a)^n = \sum_{k=0}^n \lambda_k Z(s_k)$$

Y este será insesgado si:

$$\sum_{k=0}^n \lambda_k f_l(s_k) = f_l(s_0) \text{ para todo } l = 1, \dots, p$$

La obtención de los pesos en el kriging universal, análogo al de kriging ordinario, se determina minimizando la varianza del error de predicción sujeta a la restricción de insesgamiento. Nuevamente se aplica el método de los multiplicadores de Lagrange, y teniendo en cuenta la estructura de auto correlación espacial obtenemos los pesos óptimos.

1.10 Antecedentes de Zonificación de Propiedades Físicas del Suelo con SIG

Diferentes han sido los estudios realizando análisis de variabilidad espacial de propiedades físicas y/o químicas del suelo aplicando estadística clásica, geo estadística y herramientas que faciliten dicho análisis. Se presentan diferentes estudios considerando principalmente el análisis estadístico de datos y la recopilación de campo optada por los mismos.

Bravo et al., (2007) en los llanos centrales venezolanos estudian la variabilidad espacial de propiedades físicas (textura, resistencia a la penetración) y químicas (PH, carbono orgánico total, fosforo disponible) y su relación con el rendimiento de frijol bajo un muestreo sistemático en una parcela de 2.6 ha obteniendo 213 muestras a una profundidad entre los 0 cm y 15 cm. Se realizó un análisis exploratorio y geo estadístico para estudiar los cambios espaciales de los parámetros considerados, los cuales se ajustaron a un modelo exponencial con un alto nivel de dependencia espacial. La variabilidad espacial se realizó para cada una de las propiedades utilizando herramientas geo estadísticas para definición

y ajuste de semivariogramas, las variables fueron estimadas por medio del método Krigado ordinario utilizando el programa Surfer V. 8.0 (2001).

Guatibonza, et al., (2008) realizaron en Paipa, Colombia un muestreo de 110 puntos en un área de 20 ha analizando densidad aparente, densidad real en seco y húmedo, porcentaje de poros, aireación, contenido de humedad gravimétrica, volumétrica, de saturación y relación de vacíos buscando una correlación con la conductividad hidráulica del suelo. Para ello aplicaron herramientas de Geo estadística. Inicialmente el estudio estadístico descriptivo y las pruebas de normalidad de las variables se efectuaron utilizando el software SAS V.8 y los semivariogramas y el Krigado se realizaron para determinar la variabilidad espacial de los diferentes parámetros donde se observó su comportamiento y tendencia que mostraron la dependencia espacial de las variables analizadas. Para la interpolación por Kriging se concluyó que todos los estimadores eran solo variantes del estimador básico o principal.

Maestre y De Andreu (2009) en Monagas, Venezuela evaluaron la variabilidad de las propiedades físicas de dos suelos irrigados representativos de plantaciones comerciales de palma aceitera, a fin de cuantificar la distribución espacial del impacto que tenía el manejo agronómico del cultivo sobre el suelo, para ello realizaron estudios a 4 profundidades entre 0 cm y 100 cm evaluando conductividad hidráulica saturada, densidad aparente, distribución del tamaño de partículas, porosidad total y macro porosidad en donde se realizaron análisis exploratorio y geo estadístico e interpolación principalmente a la conductividad hidráulica saturada. Del estudio se obtuvieron diferencias estadísticas y variabilidad espacial entre los suelos a partir de la estadística clásica y geo estadística, concluyendo que los mapas de contorno obtenidos usando interpolación por Kriging tienen gran potencialidad para diseñar estrategias de manejo específico por sitio. Vásques, et al., (2010) en Santa Marta, Colombia, estudiaron la variabilidad espacial de propiedades físicas y químicas del suelo en una malla de 29 m x 29 m con 184 puntos de muestreo. El análisis de datos se realizó empleando un enfoque univariado, geo estadístico y multivariado, utilizando como herramienta para el análisis geo estadístico el programa GST V 5.1 obteniendo semivariogramas experimentales de cada propiedad. El modelo de mejor ajuste teórico se eligió teniendo en cuenta el coeficiente de determinación R^2 y la suma de cuadrados residuales (RSS), posteriormente se realizó el análisis de validación cruzada,

mediante el método de interpolación por Kriging puntual que fue base para la construcción de mapas temáticos que permitieron establecer la variabilidad espacial de los parámetros evaluados. Por último, el análisis multivariado se realizó bajo análisis factorial de componentes principales y análisis de clasificación o Clustes, análisis realizado a fin de conformar grupos de suelos con características semejantes y así delimitar zonas homogéneas. (Barik, et al., 2013) en Estados Unidos, estudiaron los efectos de operación de tráfico de campo sobre los cambios en la variabilidad espacial de los agregados del suelo, densidad aparente, porosidad total, Resistencia a la penetración y contenido de humedad gravimétrica, para ello se realizaron muestreos a 3 profundidades entre 0 cm y 30 cm en un área georeferenciada de 25 m X 20 m. Las 360 muestras obtenidas, se analizaron estadísticamente en una combinación factorial de dos operaciones de campo por 3 profundidades del suelo obteniendo semivariogramas experimentales y el análisis de Kriging puntual permitió la obtención de mapas espaciales de distribución en la variabilidad de los parámetros analizados. Los semivariogramas se produjeron empleando la metodología propuesta por Isaaks y Srivastava (1989) y la interpolación de Kriging puntual se aplicó para estimar valores en puntos no muestreados con intervalos de 1m, con 6 a 10 valores medidos en búsqueda de producir un mapa de distribución de variables medidas.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Zonificar el comportamiento espacial de las propiedades hidrodinámicas del suelo en el distrito de riego RUT.

2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar las propiedades hidrodinámicas del suelo del distrito de riego RUT.
- Identificar los modelos óptimos de interpolación para describir la distribución espacial de las propiedades hidrodinámicas del suelo en el distrito de riego RUT.
- Correlacionar el estado actual de las propiedades hidrodinámicas del suelo con aspectos químicos del suelo.

3. Materiales y Métodos

3.1 Localización del Área de Estudio

El Distrito de Riego RUT está localizado al suroccidente de Colombia, al norte del departamento del Valle del Cauca, entre las estribaciones de la cordillera Occidental y la margen izquierda del río Cauca, jurisdicción de los municipios de Roldanillo, La Unión y Toro (Entre 4°25'-4°40'). El área de estudio comprende un área aproximada de 10.243 hectáreas y está limitada al occidente por el canal interceptor, al oriente por el dique de protección marginal y está dividida en dos por el canal principal de drenaje. El clima de la región corresponde al piso térmico cálido moderado (Temperatura promedio 24°C), con dos periodos secos y dos lluviosos durante el año. La altitud varía entre 915-980 m.s.n.m., su precipitación media es 1015 mm.año-1 y su evaporación promedio 1145 mm.año-1. El distrito es administrado por la Asociación de Usuarios (ASORUT), y beneficia a 1200 agricultores.

Para el desarrollo del proyecto se trabajó con la información cartográfica de suelos del IGAC y CVC (2004), la cual describe para el RUT los diferentes órdenes taxonómicos más importantes, también identifica las unidades cartográficas de suelos y cuáles son las más representativas.

Los suelos encontrados en el área de influencia del Distrito de Riego RUT pertenecen a 5 órdenes taxonómicos, siendo el orden Inceptisol y Molisol los de mayor representatividad como se evidencia en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1: Ordenes de suelo distrito RUT

ID	ORDEN	AREA (ha)	%AREA
1	Inceptisol	7869	71.1
2	Molisol	2297	20.8
3	Vertisol	733	6.6
4	Alfisol	148	1.3
5	Entisol	11	0.1
TOTAL		11058	100

Se identificaron 25 unidades cartográficas de suelos, de las cuales las más representativas son: (LM-EV)ar, RTar, LEar, CKa, (CU-MN)a, GLar, LEaxr, (LM-EV)ayr, SNb y (LM-EV)axr. A continuación, en la Tabla 3-2, se presenta la distribución de suelos por unidad cartográfica en el distrito de riego RUT.

Tabla 3-2: Distribución de suelos distrito RUT por unidad cartográfica

ID	cod_su2004	Taxonomía	AREA(ha)	% AREA
1	(LM-EV)ar	vertic Endoaquepts	4627	41.8%
2	(LM-EV)axr	vertic Endoaquepts	226	2.0%
3	(LM-EV)ayr	vertic Endoaquepts	297	2.7%
4	(LM-EV)ayxr	vertic Endoaquepts	146	1.3%
5	LEakr	Vertic Haplustepts	60	0.5%
6	LEar	Vertic Haplustepts	1085	9.8%
7	LEaxr	Vertic Haplustepts	456	4.1%
8	LEayr	Vertic Haplustepts	48	0.4%
9	CKa	Fluventic Haplustepts	826	7.5%
10	CBai	Aquic Haplustepts	50	0.5%
11	(CU-MN)a	Cumulic Haplustolls	643	5.8%
12	(NM-SN)b	Pachic Haplustolls	46	0.4%
13	RTar	Vertic Haplustolls	1304	11.8%
14	SNab	Pachic Haplustolls	59	0.5%
15	SNb	Pachic Haplustolls	245	2.2%
16	(RJ-PO)ar	Chmic Endoaquerts	3	0.0%
17	BAakr	Sodic Haplusterts	101	0.9%
18	CDaxr	Typic Natraquerts	47	0.4%
19	GLar	Udic Calciusterts	582	5.3%
20	(SJ-PM)b	Typic Haplustealfs	73	0.7%
21	ZAd2	Typic Durustalfs	63	0.6%
22	ZAe2	Typic Durustalfs	12	0.1%
23	BSa	Typic Ustipsamments	4	0.0%
24	MVaz	Aeric Fluvaquents	7	0.1%
25	MRFf3	Ladera	48	0.4%
TOTAL			11058	100%

3.2 Caracterización Propiedades Hidrodinámicas

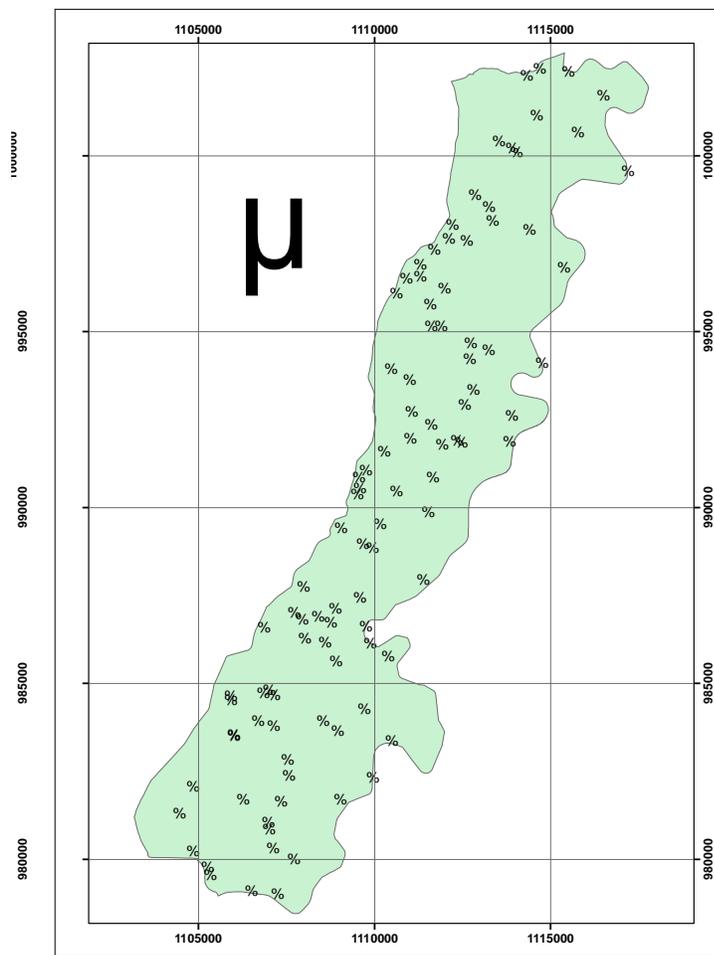
3.2.1 Selección Puntos de Muestreo

El diseño del muestreo físico se basó en 3 elementos:

- Representatividad por unidad cartográfica de suelo
- Representatividad por unidad de área
- Representatividad por cada una de las 13 zonas en las que se divide el área del distrito RUT.

En la Figura 3-1 se presenta la localización espacial de los puntos de muestreo seleccionados.

Figura 3-1: Localización puntos de muestreo



3.2.2 Diseño del Muestreo

El diseño del muestreo realizado buscó abarcar los parámetros de estudio de una manera concreta y precisa, por lo que se siguieron los siguientes parámetros:

- Como mínimo cada UCS tendrá una muestra
- Las ocho UCS identificadas con afectación por sales, tendrán 4 muestras adicionales
- Se asignaron muestras adicionales a las UCS con mayor área, teniendo en cuenta lo siguiente:
 - UCS con áreas menos a 1% del total del área: 0 muestras adicionales
 - UCS con áreas entre 1-2% del total del área: 2 muestras adicionales
 - UCS con áreas entre 2-5% del área total: 3 muestras adicionales
 - UCS con áreas entre el 5-10% del área total: 4 muestras adicionales
 - UCS con áreas entre el 10-20% del área total: 5 muestras adicionales
 - UCS con áreas entre el 20-30% del área total: 6 muestras adicionales
 - UCS con áreas entre el 30-40% del área total: 7 muestras adicionales
 - UCS con áreas mayores al 40% del área total: 9 muestras adicionales
- Se realizaron muestreos en dos puntos de cada una de las 13 zonas divisorias del distrito RUT, una muestra con afección mayor al 30% de Magnesio intercambiable y una muestra con afección menor al 30%, puntos en los cuales se realizó a manera de verificación pruebas de conductividad.

De esta manera se completaron 100 puntos de muestreo presentados en la Tabla 3-3, en esta tabla se presenta la distribución final de los puntos de muestreo resultantes de la aplicación de los criterios mencionados. En estos puntos se muestreo para determinar Densidad aparente, Diámetro Ponderado Medio, Diámetro Geométrico Medio, Índice de Poros, Porosidad Total, Micro porosidad, Macro porosidad, Capacidad de Campo y Punto de Marchitez Permanente.

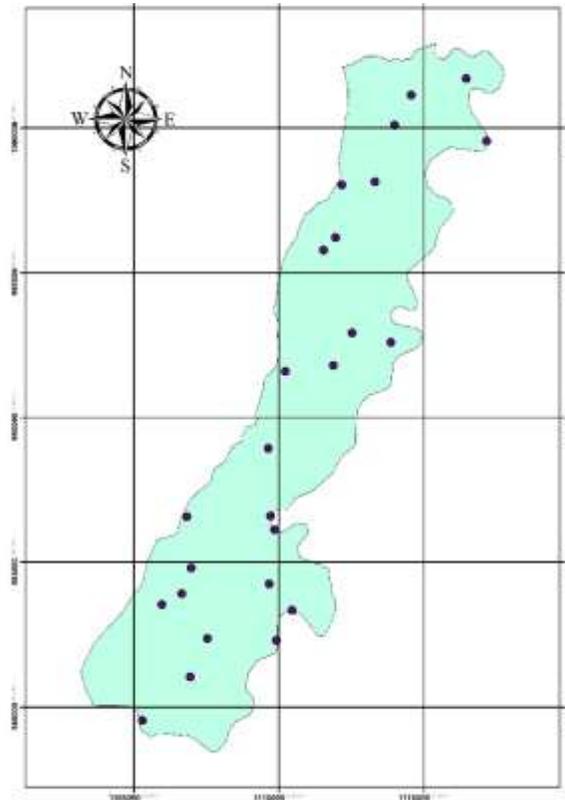
Tabla 3-3: Distribución de muestras por UCS

ID	CODIGO UCS	Taxonomía	Área / UCS (ha)	% AREA	Área/Orden (ha)	Área/Orden %	Representatividad por UCS	Representatividad por Salinidad	Representatividad por Área	TOTAL
1	(LM-EV)ar	vertic Endoaquepts	4627	41.80%			1		9	10
2	(LM-EV)axr	vertic Endoaquepts	226	2.00%			1	4	2	7
3	(LM-EV)ayr	vertic Endoaquepts	297	2.70%			1	4	3	8
4	(LM-EV)ayxr	vertic Endoaquepts	146	1.30%			1	4	2	7
5	LEakr	Vertic Haplustepts	60	0.50%	7821	70.70%	1	4		5
6	LEar	Vertic Haplustepts	1085	9.80%			1		4	5
7	LEaxr	Vertic Haplustepts	456	4.10%			1	4	3	8
8	LEayr	Vertic Haplustepts	48	0.40%			1	4		5
9	CKa	Fluventic Haplustepts	826	7.50%			1		4	5
10	CBai	Aquic Haplustepts	50	0.50%			1			1
11	(CU-MN)a	Cumulic Haplustolls	643	5.80%			1		4	5
12	(NM-SN)b	Pachic Haplustolls	46	0.40%			1			1
13	RTar	Vertic Haplustolls	1304	11.80%	2297	20.80%	1		5	6
14	SNab	Pachic Haplustolls	59	0.50%			1			1
15	SNb	Pachic Haplustolls	245	2.20%			1		3	4
16	(RJ-PO)ar	Chmic Endoaquerts	3	0.00%			1			1
17	BAakr	Sodic Haplusterts	101	0.90%	733	6.60%	1	4		5
18	CDaxr	Typic Natraquerts	47	0.40%			1	4		5
19	GLar	Udic Calcisterts	582	5.30%			1		4	5
20	(SJ-PM)b	Typic Haplustealfs	73	0.70%			1			1
21	ZAd2	Typic Durustalfs	63	0.60%	148	1.30%	1			1
22	ZAe2	Typic Durustalfs	12	0.10%			1			1
23	BSa	Typic Ustipsamments	4	0.00%	11	0.10%	1			1
24	MVaz	Aeric Fluvaquents	7	0.10%			1			1
25	MRFF3	Ladera	48	0.40%	48	0.40%	1			1
TOTAL			11058	100.00%	11058	100%	25	32	43	100

Para el caso de Ks se llevó a cabo un muestreo en 26 puntos, los cuales se seleccionaron de los 100 puntos mencionados anteriormente. Se buscó localizar los 26 puntos de tal manera que abarcaran el área de estudio y representaran las principales unidades cartográficas de suelo. (Ver Tabla 3-4 y Figura 3-2).

Tabla 3-4: Distribución de muestras Ks

ID	Código Predio	cod_su2004	Taxonomía
1	1A - 095	RTar	Vertic Haplustolls
2	2A - 135	CKa	FluventicHaplustepts
3	2C -504	CKa	FluventicHaplustepts
4	2D - 911	LEar	Vertic Haplustepts
5	3A- 067	(LM-EV)ayr	Vertic Endoaquepts
6	1B -108	RTar	Vertic Haplustolls
7	1C -302	RTar	Vertic Haplustolls
8	4B -157	CKa	FluventicHaplustepts
9	1D - 361	GLar	Udic Calcisterts
10	2B -450	(LM-EV)ar	Vertic Endoaquepts
11	3B -152	(CU-MN)a	Cumulic Haplustolls
12	5A - 415	(LM-EV)ar	Vertic Endoaquepts
13	1B - 179	LEaxr	Vertic Haplustepts
14	2A - 239	(LM-EV)axr	Vertic Endoaquepts
15	2B - 207	CKa	FluventicHaplustepts
16	2C - 528	LEar	Vertic Haplustepts
17	3B -154	LEar	Vertic Haplustepts
18	3A - 027	(LM-EV)ayr	Vertic Endoaquepts
19	2D - 899	(LM-EV)axr	Vertic Endoaquepts
20	1A - 065	BAakr	Sodic Haplusterts
21	1C -291	LEar	Vertic Haplustepts
22	1D - 385	(LM-EV)axr	Vertic Endoaquepts
23	4A -053	(LM-EV)ayr	Vertic Endoaquepts
24	4B -159	(LM-EV)ar	Vertic Endoaquepts
25	5A -105	(LM-EV)ayxr	Vertic Endoaquepts

Figura 3-2: Distribucion puntos de muestreo Ks

3.2.3 Toma de Muestras en Campo

Los métodos utilizados para los muestreos realizados en campo fueron los relacionados en la Tabla 3-5, la toma de muestras se realizó, a través de la identificación previa de las unidades cartográficas, con el estudio de suelos detallado realizado por IGAC- CVC, (2004), posteriormente se superpusieron los datos de unidad cartográfica hallados con el plano de distribución de predios en el área del distrito RUT.

La toma de muestras en campo se realizó a una profundidad de 25 cms, en el periodo comprendido en el trimestre de agosto a octubre del año 2014, el cual fue de tiempo seco normal, con algunas lluvias propias del inicio del mes de octubre.

Los equipos que se utilizaron en el muestreo de campo fueron los siguientes:

- Densidad Aparente: cilindros de PVC de diámetro 6 pulgadas, y alto de 10 cms, mazo, bloque de madera macizo, navaja, pala, plástico de empaque al vacío, cinta de enmascarar, marcador, rótulos.
- Curvas de Retención de Humedad: Rótulos, marcador, cilindros de 5 cms de diámetro y 5 cms de altura con tapa, pala plana, cinta adhesiva, mazo, bloque de madera.
- Distribución de Poros: Equipo para muestras inalteradas (mazo, anillos, barreno) cinta adhesiva, plástico para empaque al vacío, navaja.
- Estabilidad de Agregados: Pala plana, bolsas ziploc, rótulos.
- Conductividad: Gotero de Wooding aforado con tres caudales diferentes, hecho con botella plástica, soporte metálico, cinta métrica, hilo.
- El parámetro textura fue tomado del levantamiento de suelos y zonificación de tierras del Departamento del Valle del Cauca, realizado por IGAC- CVC en el año 2004.

Tabla 3-5: Relación parámetros evaluados

<i>PARAMETRO EVALUADO</i>	<i>METODO</i>
DENSIDAD APARENTE	METODO DEL CILINDRO
CURVAS DE RETENSION DE HUMEDAD	MEMBRANAS DE TENSION
DISTRIBUCION DE POROS	MESA DE ARENA
ESTABILIDAD DE AGREGADOS	YODER
CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA SATURADA	GOTERO DE WOODING

Una vez establecido el número de muestras por cada sitio, se proyectó en el plano general del distrito de riego, donde puede reconocerse el área a muestrear con datos como el código del predio y el nombre del usuario, ya habiendo obtenido la ubicación del sitio, se procedió a referenciar con GPS. Posteriormente estas muestras se llevaron al laboratorio de suelos y aguas (LASA) de la Universidad del Valle para realizar las correspondientes mediciones.

3.2.4 Análisis Estadístico de Resultados

Para la estadística de tendencia central se usó el software SPSS 20.1 (versión libre) en el cual se calcularon los promedios, máximos, mínimos, coeficientes de variación, desviación

estándar, coeficiente de Kurtosis, se construyeron histogramas de cada parámetro, se realizaron además las pruebas de Normalidad (SHAPIRO – WILK), homogeneidad (Levene), para verificar la equivalencia de grupos e independencia de las observaciones y así verificar qué tipo de prueba se debe aplicar para el análisis de los datos, (Paramétrica o no paramétrica).

3.3 Interpolación de Parámetros

3.3.1 Análisis Exploratorio de Datos

Mediante el software Gamma Design (Versión Libre) se construyeron cuatro modelos de semivariograma (Linear, Gaussian, Exponential, Spherical) con los datos de densidad aparente, micro porosidad, macro porosidad, DPM, Ks y curvas de retención de humedad georreferenciados.

Los parámetros obtenidos en cada caso permitieron seleccionar el modelo de semivariograma de mejor ajuste. Los parámetros usados para esta decisión fueron: Residual Sum Square (RSS) y proporción de varianza explicada ($C/C+Co$), donde C: varianza explicada o sill y Co: varianza no explicada o nugget. El modelo seleccionado fue aquel con menor valor de RSS y con mayor valor de proporción de varianza explicada.

La selección del método de interpolación se realizó teniendo en cuenta la proporción de varianza explicada, pues según Terra Santos (2008) los valores mayores a 75% significan existencia de alta correlación geo estadística entre los datos, por el contrario, valores menores significan baja correlación. En el primer caso se recomiendan métodos geo estadísticos y en el segundo métodos determinísticos.

3.3.2 Interpolación

La interpolación se realizó mediante el uso de la extensión Geostatistical Analyst del ArcGis 10.3.1. Se utilizó el modelo de semivariograma identificado como de mejor ajuste en el análisis exploratorio de datos y se obtuvo una superficie raster con valores de cada parámetro para la zona de estudio.

3.4 Correlación de Resultados

Mediante el uso de la herramienta raster calculator de la extensión Spatial Analyst del software ArcGis 10.3.1. se realizó la superposición de los resultados obtenidos en la etapa anterior (para cada parámetro) con mapas de los siguientes parámetros generados en otros estudios con el fin de identificar relaciones espaciales (Ver Tabla 3-6).

Tabla 3-6: Relación fuentes utilizadas

<i>MAPA</i>	<i>FUENTE</i>
Ordenes Taxonómicos	(IGAC - CVC, 2004)
Porcentaje de Magnesio Intercambiable (PMgI)	(López, Martínez, C.J, 2016)

4. Resultados y Discusión

4.1 Evaluación de los parámetros Determinados

En la Tabla 4-1, se presentan los valores de la estadística de tendencia central obtenidos para los conjuntos de datos, se puede observar que el coeficiente de variación (CV), para los parámetros D_a y micro porosidad, presenta un menor valor y por tanto se observa que sus datos son más homogéneos, presentan menor variación en el área del distrito de riego RUT, sobre todo en el parámetro Densidad aparente (D_a).

Para DPM, y Macro porosidad los valores son medios según Martínez (2003), por lo que se puede concluir que se presenta mayor heterogeneidad en los datos y se correlacionan por lo menos dos de los parámetros mencionados (DPM y Macro porosidad) con el grado de estructuración de los suelos del distrito RUT.

Para el parámetro de (K_s), se observa gran heterogeneidad, es decir los valores son bastante variables en el área del distrito de riego RUT.

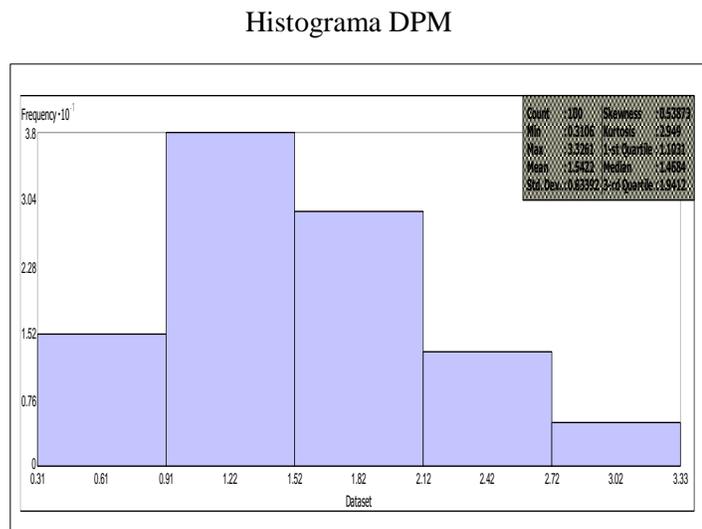
Para la desviación estándar (SD por sus siglas en inglés), al presentar valores muy cercanos a cero, excepto el parámetro (K_s), que tiene un valor de (1.20), puede analizarse que los datos se concentran alrededor de la media con algunas pequeñas variaciones entre los demás parámetros siendo los más cercanos a cero macro porosidad y micro porosidad.

Para el índice de Curtosis se interpreta en todos los parámetros medidos que se dan valores mayores a cero, por lo que se da una distribución leptocúrtica, según Martínez (2003), la cual presenta un elevado grado de concentración alrededor de los valores centrales de la variable.

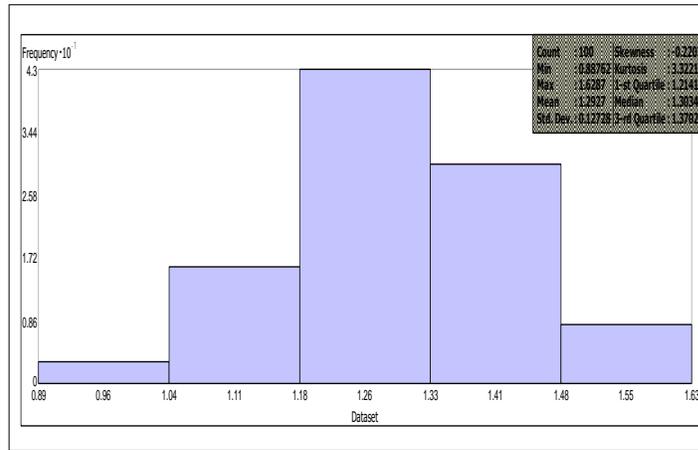
Tabla 4-1: Resumen de los parámetros determinados

<i>PARAMETRO</i>	<i>MEDIA</i>	<i>MINIMO</i>	<i>MAXIMO</i>	<i>MEDIANA</i>	<i>CV</i>	<i>SD</i>	<i>CURTOSIS</i>
DPM	1.54	0.31	3.33	1.47	41.1%	0.63	2.95
Da	1.29	0.89	1.63	1.30	9.8%	0.13	3.32
Micro porosidad	0.43	0.26	0.58	0.44	16.9%	0.07	2.87
Macro porosidad	0.08	0.02	0.22	0.08	38.3%	0.03	6.87
Ks	0.94	0.04	4.30	0.40	127.2%	1.20	5.07

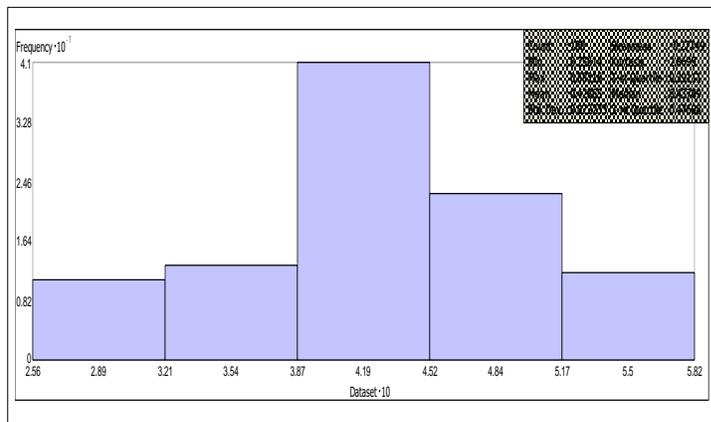
A continuación, se presentan las figuras de los histogramas de cada uno de los parámetros medidos DPM, D.a, Micro porosidad, Macro porosidad, Ks, donde se ilustran más claramente los comportamientos de la estadística de tendencia central.

Figura 4-1: Histogramas DPM, Da, microporosidad, macroporosidad y Ks

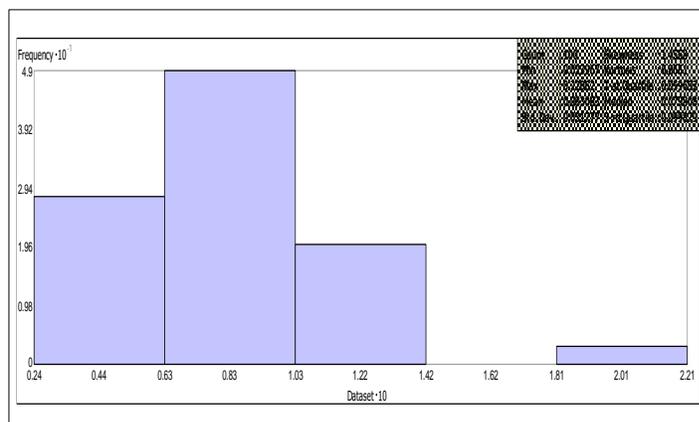
Histograma: Da



Histograma Micro Porosidad

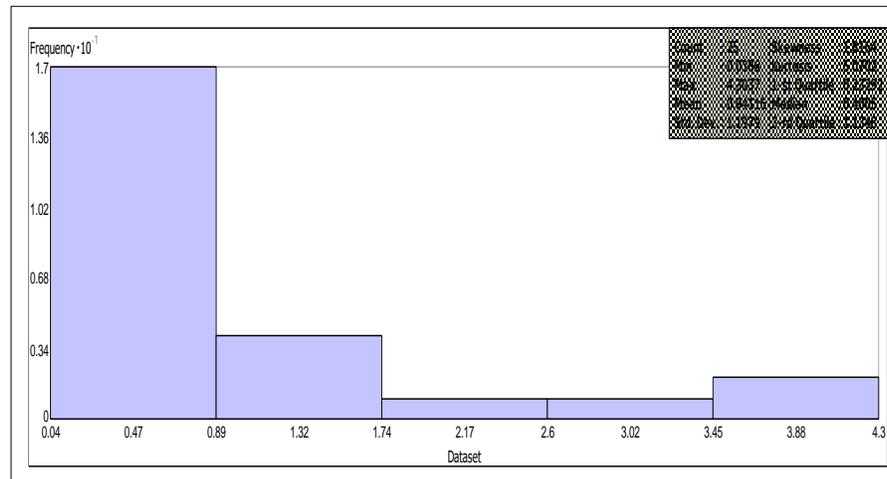


Histograma Macro Porosidad



Los histogramas de las propiedades DPM, Da, Micro porosidad y Macro porosidad, presentan una tendencia normal que puede deberse a una buena cantidad de datos analizados, aunque no debe desconocerse la posible influencia de factores externos a la hora de la toma de los datos.

Histograma Ks



El histograma de la variable Ks, presenta una distribución sesgada con una distribución asimétrica según Martínez (2003), que puede representar la necesidad de la toma de más datos, aunque esto no indica que los que fueron muestreados no sean confiables, esta distribución es típica de procesos con límites prácticos a un lado del valor nominal o a datos parciales de un proceso.

4.2 Verificación de Equivalencia e Independencia de los Parámetros Estudiados

En esta sección de la estadística diferencial, se realizaron las pruebas de Normalidad (SHAPIRO – WILK), homogeneidad (LEVENE), para la verificación de la equivalencia de grupos e independencia de las observaciones entre los parámetros físicos estudiados y la variable textura, tomada del levantamiento de suelos y zonificación de tierras del Departamento del Valle del Cauca hecho por IGAC- CVC. (2004). para establecer la prueba a aplicar (Paramétrica o no paramétrica). En la Tabla 4-2 se presentan los resultados de estas pruebas iniciales.

Se realizó entonces la comparación de los parámetros físicos en estudio y el parámetro textura. Solo se compararon los grupos texturales Arcilloso y Franco, pues el otro grupo solo tiene un dato.

Tabla 4-2: Relación de grupos de los parámetros estudiados y el parámetro textura

PARAMETRO	NORMALIDAD		HOMOCEASTICIDAD			
	SHAPIRO-WILK	LEVENE	PRUEBA	T	SIG	P-VALUE
<i>Da</i>	0.896	0.449	T - STUDENT	1.795	0.076	0.038
<i>Micro poros</i>	0.164	0.366	T - STUDENT	2.801	0.006	0.003
<i>Macro poros</i>	0	0.09	KRUSTAL - WALLIS			0.78
<i>DPM</i>	0.047	0.561	KRUSTAL - WALLIS			0.148
<i>SS</i>	0.002	0.194	KRUSTAL - WALLIS			0.014
<i>CC</i>	0	0.051	KRUSTAL - WALLIS			0.005
<i>PMP</i>	0.865	0.141	T - STUDENT	1.976	0.051	0.026
<i>Ks</i>	0	0.01	KRUSTAL - WALLIS			0.113

Se puede observar que hay diferencias significativas para los parámetros densidad aparente, micro poros, conductividad hidráulica (*Ks*) y los parámetros que determinan la curva de retención de humedad que finalmente se evidencian en el cálculo de la lámina de agua aprovechable entre los grupos texturales comparados.

4.3 Interpolaciones y Validación

El análisis exploratorio de los datos indicó que todos los parámetros presentan relación geoespacial en la zona de estudio, es decir, se obtuvieron valores de proporción de varianza explicada mayores al 75%. La selección del método de interpolación se realizó teniendo en cuenta la proporción de varianza explicada, pues según Terra Santos (2008) los valores mayores a 75% significan existencia de alta correlación geo estadística entre los datos, por el contrario, valores menores significan baja correlación. En el primer caso se recomiendan métodos geo estadísticos y en el segundo métodos determinísticos. Los modelos de semivariograma de mejor ajuste y los demás parámetros fueron calculados con el software Gamma Design (Versión Libre) y son presentados en la Tabla 4-3.

Tabla 4-3: Parámetros semi variogramas de mejor ajuste

PARAMETRO	TYPE	NUGGET	PARTIAL SILL	RANGE	RSS	R ²	C/C+Co
	MODEL	Co	C	A			
Da	SPHERICAL	0.000880	0.015280	780.0000	3.05E-05	0.103	0.946
MICROP	EXPONENTIAL	0.000600	0.004600	1170.0000	3.21E-06	0.263	0.885
MACROP	EXPONENTIAL	0.000085	0.000885	1680.0000	1.72E-07	0.409	0.912
DPM25	EXPONENTIAL	0.035000	0.356000	1290.0000	1.83E-02	0.332	0.910
0.3 BAR	SPHERICAL	2.000000	52.280000	970.0000	420	0.272	0.963
15 BAR	SPHERICAL	1.300000	42.790000	780.0000	185	0.130	0.971
ks	GAUSSIAN	0.001	1.243	1264.3971	4.98	0.148	0.999

En la Tabla anterior, se observa que los modelos de semivariograma Spherical y Exponential son los que más ajustan con los parámetros muestreados; solo la conductividad hidráulica ajustó mejor con el modelo Gaussian. Los menores valores de Co (nugget) se presentan en los parámetros Da, Micro porosidad, Macro porosidad y Conductividad Hidráulica; indicando junto a los valores de C/co+C una mayor relación espacial de las variables. Los valores obtenidos de C/Co+C son mayores al 75% en todos los casos, significando que los conjuntos de datos pueden ser interpolados por métodos geoestadísticos. En este caso fue usado el método geoestadístico Ordinary Kriging el cual ha sido usado por diferentes investigadores para modelar el comportamiento espacial de parámetros de suelo (Jaramillo , 2012; Reza et. al 2010; Jafaria et. al 2008).

La calidad de las superficies raster obtenidas en el proceso de interpolación fue evaluada mediante validación cruzada y el cálculo del PCE. Adicionalmente se tomaron los indicadores RMS y RMSS generados por el software ArcGis 10.3.1 (Extensión Geostatistical Analyst). Los indicadores mencionados se presentan en la Tabla 4-4.

Tabla 4-4: Indicadores de validación de interpolaciones

PARÁMETRO	No puntos muestreados	RMS	RMSS	PCE
Densidad Aparente	100	0.134	1.058	0.000056
Diámetro Ponderado Medio	100	0.630	1.131	0.005570
Macro Porosidad	100	0.031	1.113	0.000012
Micro Porosidad	100	0.073	1.044	0.000082
Conductividad Hidráulica	25	1.440	1.202	0.000001

Los indicadores muestran que las interpolaciones más confiables son las de Da, Micro y Macro porosidad (menores valores de RMSS y PCE). En un segundo nivel de confiabilidad

se encuentra DPM y Ks. En el caso de Ks debe tenerse en cuenta que la menor confiabilidad puede deberse al número de puntos con información. En el caso de DPM el resultado sugiere que los puntos muestreados no fueron suficientes o que no fueron localizados adecuadamente.

4.4 Interpretación de Parámetros

Para la interpretación de los parámetros medidos se decidió separarlos de acuerdo a su relación directa o indirecta con la estabilidad estructural, capacidad de almacenamiento de agua y movimiento interno del agua. La distribución final se presenta a continuación:

- Estabilidad Estructural: Diámetro Medio Ponderado (DPM).
- Almacenamiento de Agua: Lámina de Agua Aprovechable (LAA), Micro porosidad, Densidad Aparente (D.a).
- Movimiento Interno del Agua: Conductividad hidráulica Saturada (Ks), Macro Porosidad.

4.4.1 Estabilidad Estructural

La estabilidad de la estructura influye directa e indirectamente otras propiedades físicas y químicas del suelo y puede ser usada como un indicador de la degradación de los suelos (Cerde, 2000). La cuantificación de los cambios que ocurren en la estructura del suelo (desde el punto de vista cualitativo y cuantitativo) son el punto de partida en el estudio de los procesos de degradación física de los suelos y su control (Pagliai et al., 2004). Uno de los indicadores del estado estructural del suelo es la estabilidad de los agregados (Mbagwu, 2004), debido a que cuando esta sufre una disminución marcada, producto de la aplicación de fuerzas externas como el impacto de gotas de lluvia, la acción de presiones mecánicas externas, o internas como la fragmentación de agregados por explosión de aire atrapado por rápido humedecimiento e hinchamiento diferencial, se incrementa la degradación de los suelos e influye en el movimiento y retención de agua, erosión, sellado y encostrado, reciclaje de nutrientes y penetración de raíces (Bronick y Lal, 2004).

En la Figura 4-2, se presenta la distribución espacial por categorías del parámetro Diámetro Ponderado Medio, distribuido en toda el área del distrito RUT, para la clasificación se utilizaron tres categorías tomadas de IGAC (1990):

- 0 – 0.5 mm: Inestable
- 0.5 – 1.5 mm: Ligeramente Estable
- 1.5 – 3.0 mm: Moderadamente Estable

La estabilidad estructural se evalúa determinando el grado de agregación, la estabilidad de los agregados y la naturaleza del espacio poroso, características que cambian con las labores agrícolas y los diferentes sistemas de cultivo (Valenzuela y Torrente, 2013). La estabilidad estructural juega un papel importante en las relaciones suelo-agua-planta-atmosfera. La estabilidad de los agregados al agua es una propiedad fundamental para la conservación de la estructura y del suelo mismo (Valenzuela y Torrente, 2013).

Según FAO, UNEP y UNESCO, la compactación del suelo produce una disminución de la porosidad, que origina una reducción del drenaje y una pérdida de la estabilidad: como consecuencia se produce un encostramiento superficial y por tanto aumenta la escorrentía (FAO, UNEP Y UNESCO, 1980).

En las 10.243 hectáreas cultivables del distrito RUT y según valores de IGAC (1990), se presentan medidas de estabilidad estructural más exactamente del diámetro ponderado medio del suelo entre ligeramente estables (5.235 ha equivalentes al 47% del área total) y moderadamente estables,(5.788 ha equivalentes al 52%), presentando casi una uniformidad en su distribución, pero marcando las zonas de ocurrencia, es decir en la zona norte, se marca un área amplia que involucra toda la franja del distrito RUT en la que se da una estabilidad estructural moderada, dicha área corresponde a las zonas 3A, 3B, 4A y 4B, entre los municipios de La Unión y Toro, zonas en las cuales el uso del suelo se encuentra diversificado entre frutales, maíz y caña de azúcar, teniendo una mayor área en cultivos de caña de azúcar y maíz, dicho uso ha venido modificándose ya que en los inicios de operación del distrito RUT se encontraban estas áreas en cultivos semestrales.

La estabilidad estructural es un índice que se relaciona con la capacidad del suelo de mantener su disposición estructural frente al estrés causado por fuerzas exógenas (Dexter, 1988). El suelo se encuentra expuesto a una dinámica de agregación y desagregación que depende tanto de factores naturales como de factores antrópicos (Taboada, 2008). Además de permitir caracterizar comparativamente la susceptibilidad a la degradación de

diferentes manejos, la estabilidad estructural está incluida dentro de los indicadores para la evaluación de la calidad de los suelos (Doran & Parkin, 1994).

Se puede notar que en el extremo norte del distrito hay un área que coincide con valores altos de densidad aparente, como se ve en la figura 4-3 y una estabilidad ligera de las partículas de suelo, lo que confirmaría los procesos degradativos que se están presentando en esta área que tienden a la compactación de estos suelos, además según morfología realizada en el año 2004, por IGAC en la zona se evidencio que en los primeros 34 cms del perfil se tiene una estructura masiva con tendencia a bloques angulares, gruesos y débiles (IGAC – CVC, 2004).

La degradación de la estructura y porosidad de los suelos, altera la circulación de los fluidos, propiciando la ocurrencia de anegamientos y dificultando la renovación del aire edáfico (Alconada,1996; Alconada y Huergo, 1998; Alconada y Minghinelli, 1998). Por otro lado, los suelos se tornan excesivamente duros al secarse y se encostran con facilidad, entre otros perjuicios. Estas problemáticas físicas se agravan por la naturaleza textural de los suelos en estudio, con elevados contenidos de arcilla, así como por la intensidad de las prácticas de laboreo en este tipo de agricultura intensiva (Alconada,1996; Alconada y Huergo, 1998; Alconada y Minghinelli, 1998).

En la zona sur se da una estabilidad ligera en su mayoría, área que se extiende casi hasta la zona centro del distrito de riego, esta área se encuentra explotada con cultivos variados entre los que se encuentran frutales transitorios, maíz y caña de azúcar, pero esta área tiene una zona donde se da un foco de estabilidad moderada en el extremo sur del distrito en el municipio de Roldanillo en los corregimientos de Tierra Blanca, el Palmar - Guayabal, y Parcelas, corregimientos en los cuales se encuentran las zonas 1A y 2A, los usos del suelo son básicamente dominados por medianas parcelas cultivadas en frutales, maíz y caña de azúcar. Las prácticas culturales agrícolas son un poco menos agresivas y son basadas en los manejos más tecnificados que se encuentran en la producción de frutales. En estudios donde se han evaluado los impactos de los diferentes modos de producción de los agricultores, se han encontrado secuencias decrecientes en la estabilidad. Gudelj y Masiero (2000) señalaron que para un suelo de textura franco limosa de Marcos Juarez, en Argentina, encontraron índices de estabilidad relativa de 54 % para una pradera de 5

años manejada con siembra directa y 25 % para una combinación de 5 años de siembra directa y 20 años de labranza común en comparación con un suelo virgen al que se le asignó un índice de estabilidad de 100%. También Sánchez et al (1998) encontraron que, en un suelo virgen, después de seis años de incorporado el cultivo en sistemas de siembra directa la estabilidad estructural se redujo a la mitad y en un suelo manejado con labranza común la estabilidad de agregados bajo hasta seis veces.

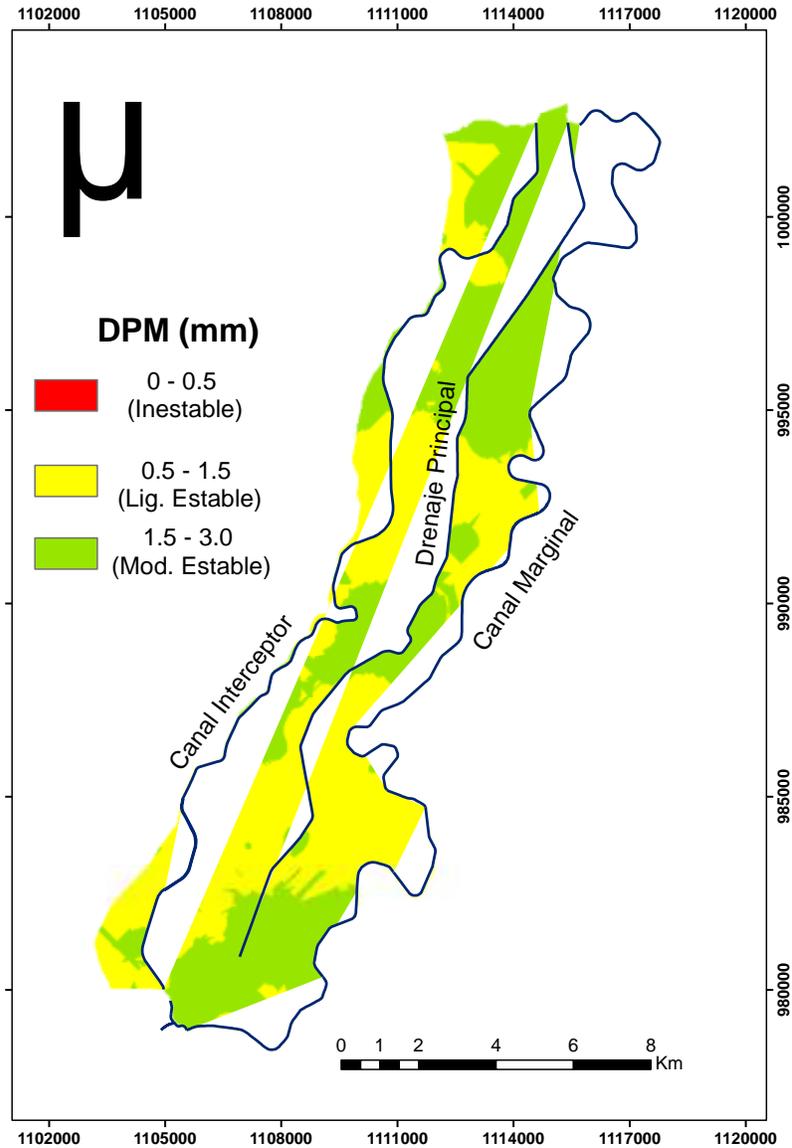
La zona centro del distrito presenta una estabilidad moderada, esta zona se concentra hacia el drenaje principal como se nota en la figura 4-2, y en el uso de suelo predomina la caña de azúcar, se debe tener en cuenta también que esta es una de las zonas más bajas del distrito, correspondiente al paisaje de planicie aluvial, además corresponde al tipo de relieve plano de desborde y es donde confluyen aguas que transitan hacia el drenaje principal, por lo que los contenidos de humedad la mayoría del tiempo pueden ser más altos que en otras zonas.

Puede entenderse como estructura del suelo, el ordenamiento de las partículas individuales en partículas secundarias o agregados y el espacio poroso que llevan asociado, todo como resultado de interacciones físico-químicas entre las arcillas y los grupos funcionales de la materia orgánica (Porta et al., 1999). Por otro lado, se refiere al tamaño, forma y arreglo de partículas sólidas y poros, continuidad de poros y su capacidad para retener y transmitir fluidos y sustancias orgánicas e inorgánicas, así como la habilidad para garantizar el crecimiento y desarrollo de raíces (Lal, 1991).

En general se puede inferir del plano presentado que no existe una buena estabilidad en los agregados del suelo y que las partículas tienen algún grado de inestabilidad, por lo que se empieza a manifestar un grado de deterioro en las propiedades físicas del suelo. Dentro de las propiedades físicas, la estabilidad estructural es considerada un atributo sensible a la recuperación o degradación en lapsos relativamente cortos, por tratarse de una propiedad de carácter dinámico (Doran y Parkin, 1994; Wilson et al., 2000; Parra et al., 2011; Gabioud et al., 2011). Por otro lado, Andreu et al., (2012) consideran a la estabilidad estructural como un componente importante de la calidad del suelo, dado que sus valores son resultantes de la calidad de los poros, el aporte orgánico y la actividad biológica. Estos aspectos de la calidad edáfica cobran especial relevancia en el contexto de suelos

texturalmente finos como los estudiados y en producciones intensivas como la hortofrutícola

Figura 4-2: Comportamiento DPM en el RUT



4.4.2 Almacenamiento de Agua

En las Figuras 4-3, 4-4 y 4-5, se presenta la distribución espacial por categorías de los parámetros Densidad Aparente, Micro poros, y Lámina de Agua Aprovechable, distribuidos en toda el área del distrito RUT:

La densidad aparente facilita el crecimiento de las plantas y el enraizamiento al permitir la circulación del agua y del aire, los valores de densidades críticas para el enraizamiento son: $D_a < 1,5$ franco arcillosos y $< 1,9$ franco arenosos (FAO, UNEP Y UNESCO, 1980). Esta medida debe ser monitoreada periódicamente con lo que su aumento anual marcaría el grado de degradación en el que se encuentren los suelos. Para la Densidad Aparente se propusieron las siguientes categorías tomadas de Schargel y Delgado (1990).

- 0.9 – 1.1 gr.cm-3: Baja
- – 1.4 gr.cm-3: Media
- 1.4 – 1.65 gr.cm-3: Alta

En definitiva, se produce la degradación de las propiedades del suelo y una disminución de la masa de suelo. Estos efectos tienen dos consecuencias generales: a corto plazo, disminución de la producción y aumento de los gastos de explotación (cada vez el suelo necesita mayor cantidad de abonos y cada vez produce menos). A largo plazo: infertilidad total, abandono y desertización del territorio (Valenzuela y Torrente, 2013). Para el almacenamiento del agua en los suelos también es muy importante la situación de la micro porosidad, que es la encargada de la retención de agua en el complejo edafológico. La porosidad depende de la textura, de la estructura y de la actividad biológica del suelo. Cuanto más gruesos son los elementos de la textura mayores son los espacios entre ellos (Valenzuela y Torrente, 2013).

Una porosidad elevada asegura la conservación del agua y favorece los intercambios entre el vegetal y el suelo, permitiendo la difusión del agua y del aire (Valenzuela y Torrente, 2013).

Para la distribución de Micro Poros se propusieron las siguientes categorías, según IGAC (1990):

- – 18 %: Muy Baja
- 18 – 35 % : Baja
- 35 – 41 % : Media
- 41 – 55 %: Alta

Para La Lámina de Agua Aprovechable (LAA), se propusieron las siguientes categorías, según SCCS (1990):

- – 5 cm.m-1: Muy Baja
- 5 – 10 cm.m-1 : Baja
- 10 – 15 cm.m-1: Media
- 15 – 20 cm.m-1: Alta

La densidad aparente puede afectar el desarrollo de los cultivos debido al efecto que tienen la resistencia y la porosidad del suelo sobre las raíces. Con un incremento de la densidad aparente, la resistencia mecánica tiende a aumentar y la porosidad del suelo tiende a disminuir, con estos cambios limitan el crecimiento de las raíces a valores críticos (Rubio, 2010). Los valores críticos de la densidad aparente para el crecimiento de las raíces, varían según la textura que presenta el suelo y de la especie de cultivo de que se trate (Rubio, 2010).

Los valores bajos de densidad aparente son propios de suelos porosos, bien aireados, con buen drenaje y buena penetración de raíces, lo que permite un buen desarrollo de las raíces. (Rubio 2010). Los valores altos de densidad aparente son propios de suelos compactos y poco porosos, con aireación deficiente e infiltración lenta del agua, lo cual puede provocar anegamiento, anoxia y que las raíces tengan dificultades para elongarse y penetrar hasta alcanzar el agua y los nutrientes necesarios (Rubio, 2010). En estas condiciones, el desarrollo y crecimiento de las plantas es impedido o retardado consistentemente (Donoso, 1992).

Dado que la textura predominante en el área del distrito de riego RUT es arcillosa, puede observarse según el plano generado que los valores para densidad aparente que son más representativos en el área productiva del distrito son valores medios (10.412 ha equivalentes al 94% del área total) y que existen pequeñas manchas atomizadas en el área del RUT, pero con un área de mayor afección en la zona norte del distrito, que tiene valores que llegan a niveles altos (551 ha equivalentes al 5%). La susceptibilidad a la compactación o la vulnerabilidad que presenta un suelo a la compactación, depende de factores inherentes al suelo, clima y prácticas de manejo (Amezquita y Chavez, 1999). La máxima compactación que puede alcanzar un suelo está fuertemente relacionada con la presencia de partículas minerales de menor tamaño, con la retención de agua a bajos potenciales mátricos y con el contenido de materia orgánica (Amezquita y Chavez, 1999).

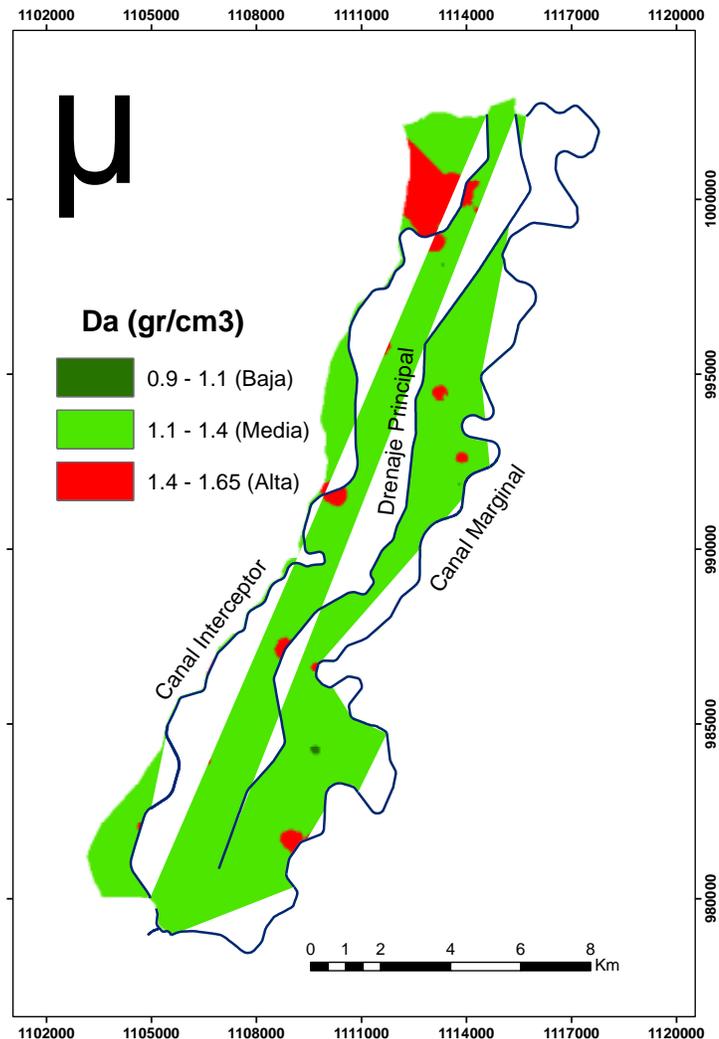
El área con mayor afección está ubicada entre el pie de monte de la cordillera occidental y el canal interceptor a la altura del km 5 de la mencionada estructura, esta área con mayores valores de densidad aparente, se encuentra ubicada en las zonas 5A y en menor proporción en la zona 3B del distrito RUT, en el municipio de Toro en los corregimientos de San Antonio y el Bohío, el uso del suelo en esa zona es predominante en caña de azúcar por lo que se utilizan grandes maquinarias para preparación de suelos previos a la siembra, abonadoras durante el ciclo de desarrollo del cultivo y de cosecha propios de la industria cañera, estas prácticas vienen desarrollándose en el área aproximadamente hace 15 años, en muchas ocasiones sin tener en cuenta los grados de humedad de los suelos a la hora de la cosecha, lo que puede influir en el aumento de los valores de la densidad aparente y dichos datos están marcando una fuerte tendencia a procesos de compactación de los suelos de esta zona, sin embargo y según estudio de IGAC realizado en 2004, en la zona, la morfología de esta área muestra gran cantidad de poros medios y gruesos, mucha actividad de microorganismos, un drenaje interno medio y externo lento lo que puede influir en los altos índices de densidad aparente.

En los campos agrícolas en los cuales se practica agricultura intensiva (alto uso de maquinaria agrícola), normalmente se encuentran problemas de compactación a diferentes profundidades, dependiendo del tipo de implemento que se use en la preparación del suelo, del contenido de humedad al cual se preparan los suelos y de la intensidad de uso del suelo (Amezquita y Chavez, 1999).

En campo, es posible encontrar compactación causada por las llantas de la maquinaria utilizada para las diferentes labores, la cual es localizada y se puede observar por las huellas que quedan en el sitio cuando se trabaja el suelo en condiciones muy húmedas; se encuentran capas compactadas por el uso de implementos de labranza a una misma profundidad, las cuales se conocen como "piso" (Amezquita y Chavez, 1999). Es común encontrar piso de arado, piso de big-rome, piso de rastra y piso de rotovator. En el horizonte superficial de suelos volcánicos profundos de Colombia, (Amezquita y Chavez, 1999) han encontrado piso de arado, piso de rastra y piso de rotovator, haciendo que un horizonte que genéticamente es uniforme, se comporte como un perfil físico con tres o cuatro capas físicas diferentes (Amezquita y Chavez, 1999). Estas manifestaciones de la compactación

y su influencia en la capacidad productiva de los suelos generalmente pasan desapercibidas a muchos técnicos y agricultores, según los autores.

Entre los problemas de degradación física, que cubren 83 millones de hectáreas de tierras agrícolas a nivel mundial, la compactación y el adensamiento son los principales y deben corregirse porque crecen constantemente y causan fuertes decrementos en los rendimientos de los cultivos. El hectareaje mencionado, puede ser mucho mayor porque hay pocas evaluaciones alrededor de estos problemas (Amezquita y Chavez, 1999). La compactación de suelos agrícolas tiene serios impactos económicos y ecológicos y es uno de los mayores problemas que enfrenta la agricultura mundial (Soane y van Ovwerkerk, 1994). Sin embargo, el impacto económico de la compactación es difícil de cuantificar puesto que siempre aparece interactuando con otros factores que afectan procesos importantes en los suelos (Voorhees, 1987). El impedimento mecánico debido a la compactación y a la presencia de capas endurecidas (adensadas), es la principal causa de disminución de los rendimientos y de la insostenibilidad de los suelos tropicales, debido a los efectos negativos que causan en el crecimiento de las raíces (Amézquita, 1998).

Figura 4-3: Comportamiento Da en el área RUT

Las características de los poros del suelo son importantes indicadores de la calidad del suelo. Los volúmenes totales, la distribución del tamaño y forma de los espacios de los poros del suelo determinan muchos procesos y funciones, tales como el almacenamiento y transmisión de agua, difusividad del gas, la actividad microbiana y la resistencia mecánica a la penetración de las raíces (Cameron y Buchan, 2006; Munkholm et al., 2012; Strong et al., 2004).

La micro porosidad de los suelos del distrito de riego RUT se encuentra entre media (2.906 ha equivalente al 26% del área total) y alta (7.950 ha equivalentes al 72% del área), en la mayoría del área, esta puede ser una característica normal en suelos con texturas finas

como las arcillas, dado que los suelos del distrito RUT son arcillosos podría decirse que este tipo de porosidad es normal. Por otra parte los suelos que tienen una mayor tendencia a compactarse presentan generalmente texturas medias a gruesas (Amezquita y Chavez, 1999). Se ha comprobado que en suelos de texturas medias a gruesas cuando se aplican presiones altas se logra obtener valores más altos de densidad aparente, que en suelos de texturas arcillosas, especialmente cuando los contenidos de limo y/o arena fina son abundantes, según los autores anteriores. El efecto de la compactación en la reducción de la aireación se hace más crítico en suelos de texturas medias a finas, que en suelos de texturas gruesas, los cuales tienen más macroporos que los suelos de textura fina (Amezquita y Chavez , 1999).

Dado que los micro poros son los encargados de retener el agua en el suelo, se observa una gran cantidad de estos en toda la zona norte del distrito especialmente en las zonas correspondientes al municipio de Toro, situación que es congruente con el día a día en campo, pues esta área es la que más contenido de humedad sostiene, además se debe tener en cuenta que la pendiente natural del distrito decrece hacia esa área, además los diseños hidráulicos de la infraestructura desembocan hacia esa zona, es decir que en época de invierno todos los drenajes confluyen en esa zona lo que evidencia claramente mayores niveles freáticos, afloramiento de aguas superficiales, aumento en el nivel de drenajes y en verano tal vez es la zona con un poco menos requerimiento hídrico para los cultivos existentes. Suelos con deficiente formación de grietas, bioporos o macroestructura producida por el manejo, es decir una reducida proporción de macroporos de diferente origen, tienen características de pobre calidad física (Guérif et al., 2001). Trabajos realizados por Richard et al., (2002) y Dexter (2004) sobre suelos de texturas franca y franco - limosa, demostraron que cuando los poros de mayor tamaño son destruidos por prácticas de manejo se produce un incremento de los poros de menor tamaño con lo cual se ve afectada la calidad física de los suelos.

El uso del suelo en esta zona como ya se mencionó anteriormente se da en su mayoría en el cultivo de caña de azúcar. En la administración del distrito RUT, se cree que esta es tal vez la zona más apta para el cultivo de la caña de azúcar por su alto grado de humedad y menor demanda de agua para riego. Como consecuencia de la deformación y de la ruptura de agregados a que es sometido el suelo durante las labores de preparación, la

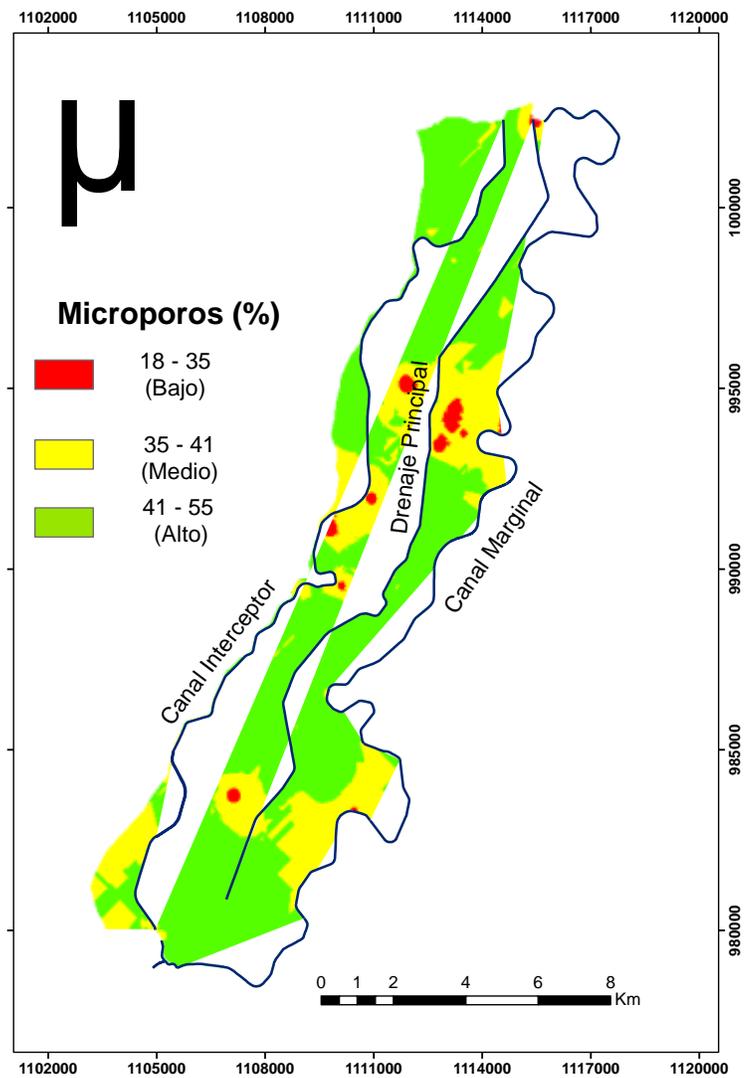
compactación está siempre acompañada de la pérdida de volumen de poros especialmente de los más grandes (Amézquita y Chavez, 1999). Esto causa pérdida en la permeabilidad al aire, en el flujo de agua y de iones, y restricciones en el crecimiento de las raíces. Los cambios negativos en la porosidad total del suelo y en la distribución del tamaño de los poros, causan cambios en los procesos de interceptación, flujo de masa y difusión, por los cuales se nutren las plantas, los cuales se suceden fundamentalmente por macro, meso y microporos respectivamente (Amézquita y Chavez, 1999).

En la zona centro del distrito ocurre un comportamiento similar a la zona norte, ya que es la zona que confluye al drenaje principal entre el municipio de Roldanillo y La Unión, áreas que han sido históricamente húmedas desde su génesis ya que eran zonas de laguna, antes de la construcción del distrito RUT, y después del funcionamiento del RUT se encuentra una zona de batea en el perfil transversal de la infraestructura, en estas zonas se encuentra un uso del suelo más variado, pero podría decirse que marcado, ya que a lo largo de la franja que bordea el drenaje principal se da en mayor medida el cultivo de caña de azúcar, pero a medida que se aleja del drenaje principal la tendencia de uso del suelo empieza a cambiar con frutales y especialmente cuando se acerca hacia el canal marginal como lo muestra la figura, se empiezan a encontrar pequeñas parcelas con frutales más tecnificados, hacia la zona del corregimiento de Candelaria del municipio de Roldanillo, donde se hace un manejo más eficiente del servicio de agua para riego. La micro porosidad puede considerarse como un espacio de poros de saturación. La Hidratación y procesos de deshidratación sólo pueden alterar la distancia entre capas entre las capas de arcilla mediante la adición o eliminación de las moléculas de agua. Por el contrario, la macro porosidad es un sistema de dos fases que puede contener tanto agua en estado líquido y de vapor. Las moléculas de agua se intercambian entre estas dos escalas de porosidad (Sedighi y Thomas, 2014).

En el extremo sur del distrito se da una zona marcada de mayores niveles de micro poros que representa un área importante, zonas en las cuales el uso del suelo se da en cultivos de maíz, guayaba, uva, melón, papaya, caña de azúcar y se concentran zonas pobladas pertenecientes al municipio de Roldanillo. La alteración de las condiciones del suelo por las prácticas de manejo puede afectar la producción de los cultivos, por un lado, a través de su influencia en la distribución de la materia orgánica, actividad microbiana y dinámica

de nutrientes; y, por otro lado, modificando propiedades físicas del suelo como agregación y porosidad (Díaz Zorita et al., 2002). En estudios realizados se ha encontrado que la disminución del volumen ocupado por los poros de transmisión en los lotes con siembra directa continua se debería a su colapso producto del tránsito de las maquinarias, sin regeneración de los mismos (Sasal et al., 2006). Esta pérdida de macro porosidad resulta en un incremento significativo del volumen ocupado por los Mesoporos del horizonte superficial de los suelos bajo Siembra directa. Amiotti et al. (2012) señalan que los cambios causados por la compactación en los suelos están caracterizados por un incremento en los poros de tamaño $< 9 \mu\text{m}$, en detrimento de los MacroPoros.

En general la zona del distrito RUT al ser suelos formados por depósitos aluviales y tener un drenaje interno lento, externo lento y una dominancia en su distribución de poros de pequeño tamaño, es un área que para ser productiva debe ser drenada artificialmente.

Figura 4-4: Comportamiento Micro poros en el área RUT

La necesidad de satisfacer la demanda actual y creciente para el alimento estimula el desarrollo de la investigación relacionados con la gestión y uso del agua, un elemento esencial factor de aumento de la producción agrícola, ya que una aplicación eficiente del agua depende fundamentalmente de la capacidad de infiltración del suelo (Machiwal et al, 2006). Mantener niveles adecuados de agua en el suelo es fundamental para garantizar el éxito de las cosechas en el campo, unido a factores de manejo de los suelos, semillas mejoradas y fertilizantes (Chicas et al, 2014).

Sandoval (2007) manifiesta que existen ciertas etapas muy sensibles del ciclo del cultivo en los cuales un déficit de agua puede provocar una disminución significativa en el rendimiento pudiéndose determinar mediante experimentos que el período crítico es el de floración y formación de fruto. Según Taboada y Micucci (2002) una forma práctica de expresar y visualizar la cantidad de agua existente o almacenada en el suelo es en términos de lámina de agua.

El plano de lámina de agua aprovechable (LAA), en los suelos del distrito de riego RUT, tiene una buena correlación con los datos de micro porosidad, ya que en las zonas donde se evidencia deficiencia de micro porosidad, se notan niveles de LAA más bajos, (1.698 ha equivalentes al 15% del área total) en general los niveles de humedad aprovechable, dentro del distrito RUT, son medios, (8.510 ha, equivalentes al 77.2%). según SCCS (1990), resultados que también son congruentes con la mayoría encontrada en el parámetro Densidad aparente. El agua disponible para las plantas, según el concepto clásico, tiene como límite inferior el punto de marchites y como límite superior la capacidad de campo (Richard et al., 2001). En la actualidad este concepto es aceptado para condiciones de suelo sin degradación física, pero es cuestionado para condiciones de suelos degradados, donde la densidad aparente y resistencia aumentan, la porosidad se reduce y la distribución y tamaño de los poros se altera (Richard et al., 2001).

Al comparar los niveles altos de micro poros en la mayoría del área del distrito de riego RUT y la humedad aprovechable media, presente en casi toda el área, se puede evidenciar el inicio de problemas físicos que no están permitiendo la adecuada retención de agua aprovechable para la planta, también debe tenerse en cuenta que la mayoría de los suelos del RUT son arcillosos, que en condiciones naturales normales son suelos que deberían tener una muy buena retención de humedad, (solo se encuentran 716 ha equivalentes al 6.5% del área con valores altos de LAA), situación que debe ser preocupante para los usuarios del distrito porque deben empezarse a realizar controles más exactos de la aplicación de agua a los cultivos y evaluar su eficiencia, porque en la actualidad es un recurso escaso y uno de los mayores costos de producción y un factor relevante a la hora de cuantificar las cosechas esperadas. Los suelos con estructura preservada apenas tienen restricciones por déficit hídrico (Costa et al., 2008) y por el contrario, cuando la compactación aumenta a niveles excesivos la aireación puede afectarse si la humedad es

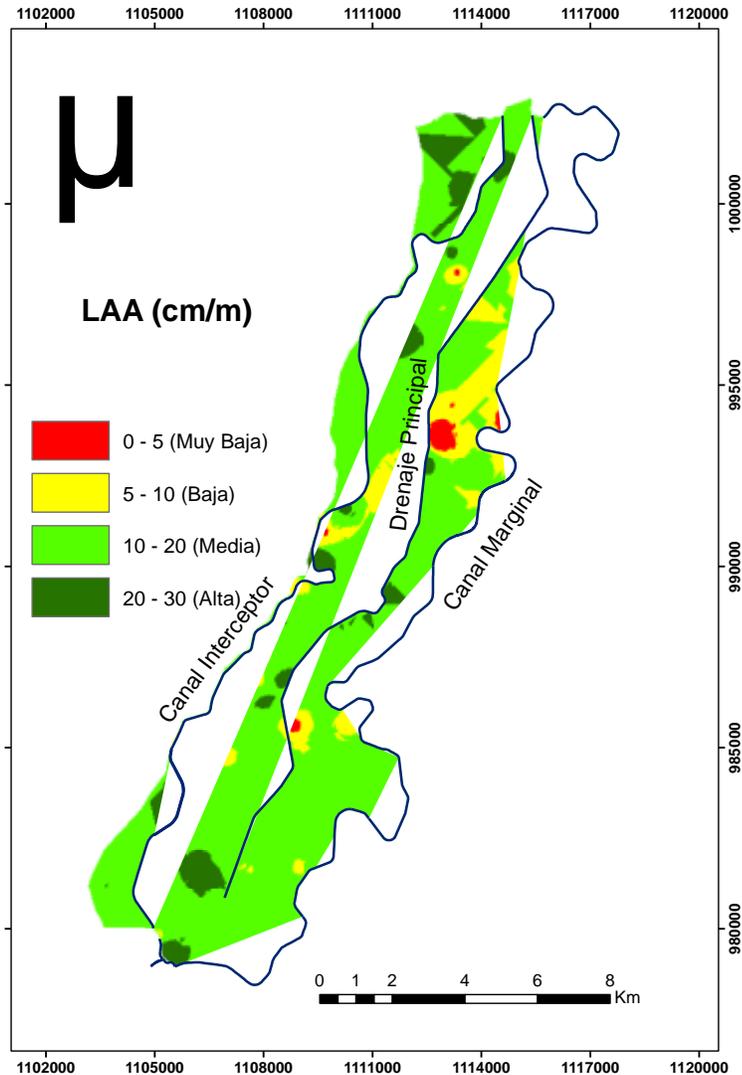
alta y por otra parte, en condiciones de suelo seco, la resistencia del suelo puede restringir el crecimiento de las plantas (Lapen et al., 2004).

La calidad física de los suelos se refiere fundamentalmente a parámetros como la resistencia mecánica, la transmisión y el almacenaje de fluidos en la zona de exploración de las raíces. Los suelos con buena calidad física deben tener características de almacenaje y transmisión de fluidos que permitan proporciones adecuadas de agua, nutrientes disueltos y aire como para promover el máximo desarrollo de los cultivos y una mínima degradación ambiental (Topp et al., 1997). Una estimación indirecta de la capacidad de almacenar agua y aire en la zona de exploración de las raíces se da a través de la estabilidad de la estructura, debido a que este parámetro gobierna tanto los aspectos relacionados con la compactación, como los vinculados con el almacenaje y movimiento de agua y aire (Reynolds et al., 2002; Dexter, 2004).

En general este factor presenta un comportamiento bastante homogéneo, con áreas críticas con retenciones de agua muy bajas e igualmente unas pequeñas zonas con muy buen comportamiento.

Esta medición se realizó a los primeros 25 cms del perfil de suelo y no guarda ninguna relación con métodos de riego utilizado, ni el tipo de laboreo realizado al suelo, ya que el comportamiento de la LAA, se da indistintamente de la zona y uso del suelo. Además puede ser que esta tendencia a disminuir la retención de agua del suelo, se haya venido empezando a dar por el cambio abrupto en el uso del suelo, ya que al año 2016, se encuentra un 50% del área total del RUT sembrada en caña de azúcar, cuando el distrito fue creado por sus condiciones de infraestructura, hidro climatología, y suelos para el cultivo de granos, frutas y hortalizas. Con ese cambio de uso del suelo vinieron también cambios fuertes en el uso de maquinaria lo que puede marcar una tendencia al deterioro de las propiedades hidrodinámicas del suelo.

Figura 4-5: Comportamiento LAA en el área RUT



4.4.3 Movimiento Interno del Agua

En las Figuras 4-6 y 4-7, se presenta la distribución espacial por categorías de los parámetros Macro poros y Conductividad Saturada (K_s), distribuidos en toda el área del distrito RUT:

Un factor importante que tiende a desarrollar la porosidad es la actividad biológica del suelo, especialmente la microfauna (Valenzuela y Torrente, 2013). La capacidad del aire

del suelo define el suministro de oxígeno a las raíces, el intercambio gaseoso con el medio ambiente y favorece en ciertas condiciones la formación de un extenso sistema radicular que facilita la absorción de nutrientes y agua para las plantas. La capacidad de aire y el drenaje del suelo están relacionados con los poros de diámetro de gran tamaño o macro poros (Valenzuela y Torrente, 2013).

Para la distribución de Macro Poros se propusieron las siguientes categorías, tomadas de IPAZ (2011).

- 0 – 5 %: Muy Baja
- 5 – 10 % : Baja
- 10 – 15 % : Media
- 15 – 25 %: Alta
-

La compactación del suelo produce una disminución de la porosidad, que origina una reducción del drenaje y una pérdida de la estabilidad, como consecuencia se produce un encostramiento superficial y por tanto aumenta la escorrentía (FAO, UNEP Y UNESCO, 1980).

Para la Conductividad Hidráulica Saturada (Ks), se propusieron las siguientes categorías, según IGAC (1990).

- – 0.5 cm.hora-1: Baja
- 0.5 – 1.5 cm.hora-1 : Media
- 1.5 – 5.0 cm.hora-1: Alta

Los macroporos cumplen en el suelo funciones muy específicas: son los poros de drenaje, permiten el ingreso del agua al suelo (infiltración, aceptación de aguas), permiten la aireación y crecimiento de raíces (Amezquita y Chavez, 1999). Los pelos absorbentes casi que exclusivamente crecen dentro de los macroporos, por ello en un suelo de buena calidad, se exige que haya un porcentaje de macroporos mayor del 10% y que éstos sean capaces de deformarse por la presión de turgencia que produce el crecimiento de las raíces (Amezquita y Chavez ,1999). En suelos compactados, hay pocos macroporos y no hay capacidad o muy poca de deformación, por ello, las raíces no pueden expandirse o sus cofias no pueden penetrar poros inferiores a sus diámetros, la consecuencia de esto,

es bajo rendimiento del cultivo por poco desarrollo de raíces (Amezquita y Chavez, 1999). Para que suceda el proceso nutricional, los iones o nutrientes deben ponerse en contacto con las raíces de las plantas. El contacto se realiza por tres fenómenos: interceptación por las raíces, flujo de masa y difusión. Cualquier práctica agrícola que altere negativamente el tamaño de los poros, afecta a estos fenómenos y a los rendimientos de los cultivos, a la sostenibilidad del suelo y por lo tanto la sostenibilidad agrícola (Amezquita y Chavez, 1999).

Por lo tanto, los estudios sobre las características de los poros del suelo son extremadamente útiles para evaluar la estructura del suelo y la calidad del suelo. La estructura del suelo de los poros es muy sensible a las prácticas de manejo de suelos y los cambios ambientales. Estudios previos indicaron que el uso de la tierra, laboreo, fertilización, y la compactación podría alterar la porosidad, tamaño total, distribución y funcionalidad de los poros del suelo y por lo tanto afectan a la química, procesos físicos y biológicos en los suelos (Cassaro et al., 2011; Da Costa et al., 2014; Lipiec et al., 2006, 2012). Los estudios demostraron que las mejores descripciones de la distribución del tamaño de poros del suelo son muy útiles para la comprensión de un número de procesos que se producen en los suelos, tales como la estabilidad estructural, movimiento de agua y solutos y el secuestro de carbono orgánico (Lipiec et al., 2006, 2012)

En el factor de la macro porosidad de los suelos del distrito de riego en el que se realizó el estudio, se puede decir que es totalmente congruente con el plano en el que se muestra la micro porosidad, es decir que en la mayor parte de los suelos del RUT, hay una deficiencia de macro poros, (9.937 ha equivalentes al 90% del área total), ya que el factor centra la mayoría de los datos en el rango de bajos, situación contraria a lo hallado con los micro poros, además se encuentran unas pequeñas manchas críticas de muy bajos niveles y una zona en el extremo sur del área que está en niveles medios y unas pequeñas áreas en niveles altos.

La falta de macro poros es un factor de relevancia sobre todo en un área de un distrito de riego cuyo valor más importante es el manejo del servicio de agua para riego ya que los macro poros son fundamentales en el movimiento del agua, infiltración, percolación y drenaje, además cumplen la función del intercambio gaseoso (oxígeno y dióxido de

carbono) y además proveen espacio para el crecimiento de las raíces. Martino, (2003) señaló que la disponibilidad de agua es el factor que rige el desarrollo de los cultivos, porque afecta marcadamente la tasa de difusión de oxígeno, la temperatura y la resistencia mecánica de los suelos.

Si el suelo está completamente saturado con agua, son los macro poros los cuales drenan el suelo, si los macro poros fallan en drenar lo cual puede ocurrir por varias razones; incluyendo la pérdida de estos y/o un drenaje pobre, el área presentara niveles perjudiciales de humedad que pueden llegar a afectar los cultivos establecidos (Martino, 2003).

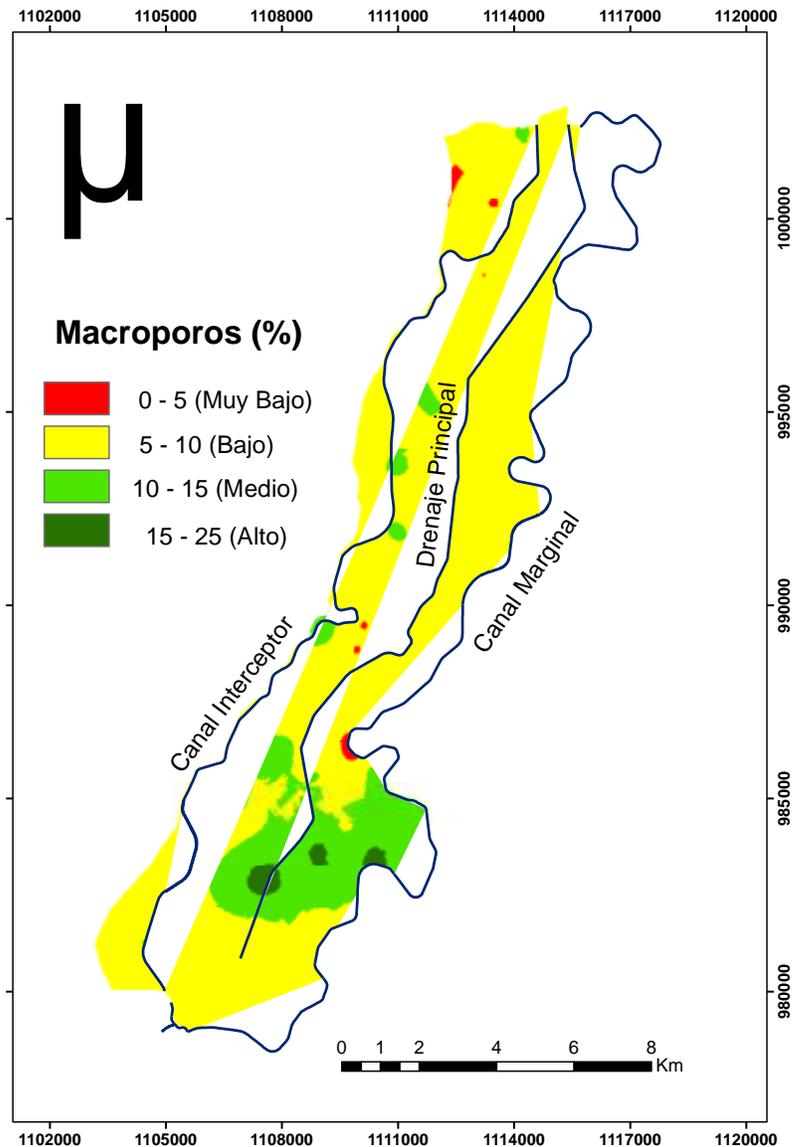
El suelo puede transformarse desde un suelo con niveles adecuados de oxígeno (aeróbico) a un suelo con niveles limitados de oxígeno (anaeróbico) (Martino, 2003). Los niveles anaeróbicos pueden ser perjudiciales para los cultivos establecidos en el RUT, ya que pueden presentarse pudrición de raíces y formación de elementos potencialmente tóxicos que afecten las producciones, además debe tenerse en cuenta que la mayoría de los suelos del distrito eran áreas inundables por lo cual puede acentuarse la tendencia de los suelos a ser anaeróbicos (IGAC-CVC, 2004).

Esta área que se encuentra entre la cordillera occidental y la margen izquierda del río Cauca, pertenece al paisaje planicie aluvial, donde su tipo de relieve es plano de desborde por lo que la convierte en una cubeta de decantación que tiene un drenaje interno lento, externo lento y natural muy pobre (IGAC-CVC, 2004).

Sin embargo se puede mencionar que dentro del distrito RUT, se tiene una red de drenaje compuesta por un dren principal de 26 kms que recorre el distrito de sur a norte, diseñado para un caudal de 26 m³.s⁻¹ y una red de canales que suma 450 kms entre secundarios y terciarios, además de una estación principal de drenaje ubicada en el km 4 del dren principal con una capacidad instalada de bombeo de 6.9 m³.s⁻¹ para completar la red de evacuación de aguas sobrantes, escorrentías, niveles freáticos y aguas lluvias que puedan afectar la zona productiva del RUT, lo cual fue uno de los propósitos principales de la creación del distrito en esta zona ya que al parecer los diseñadores encontraron esta

dificultad como uno de los principales retos a superar para recuperar la zona para la producción agrícola.

En general, la situación de macro porosidad de los suelos del RUT no es buena, en algunas situaciones esta puede ser una gran limitante de producción, pero en esta área se cuenta con una buena red de drenaje que amortigua en buena medida esta afección física de los suelos, y se ha venido demostrando con la explotación hecha en los suelos del distrito, durante los últimos 50 años, sin embargo no se debe desconocer que debe ser un parámetro monitoreado y que requiere bastante atención, además la red de drenaje debe mantenerse con un estricto mantenimiento para su buen funcionamiento, sobre todo en la zona norte del RUT que es donde se evacuan estas aguas.

Figura 4-6: Comportamiento macroporos en el área RUT

Para el parámetro conductividad hidráulica, dentro de la zona RUT, se tiene un comportamiento medio, (7.420 ha, equivalentes al 67.3% del área Total), que se relaciona directamente con la deficiencia de macro poros presentada en la Figura 4-6. Sin embargo en este parámetro se dan unas zonas amplias que tienen problemas marcados de baja conductividad, (2.596 ha que equivalen al 23.5%), y solo 1.008 ha (que equivalen al 9.14 % del área total) tienen alto valor de K_s , lo que es muy grave considerando que se trata de

un distrito de riego, causa especial atención que la zona más amplia con afectación se encuentra en el municipio de Roldanillo, casi en toda la zona 1A, zona que ha sido privilegiada con un continuo servicio de agua para riego y que se caracteriza por una buena infraestructura de drenaje superficial.

Existe amplio consenso en identificar valores óptimos de parámetros tales como la densidad aparente, la porosidad, el contenido de carbono orgánico y la capacidad de retención de agua del suelo (Reynolds et al., 2002). Todos ellos pueden determinar la calidad física del suelo, con la finalidad de mejorar la productividad de los cultivos manteniendo a la vez la calidad ambiental (Reynolds et al., 2002). Varios autores han determinado que la resistencia a la penetración es un parámetro más sensible que la densidad aparente para detectar los efectos de las prácticas de manejo sobre el suelo (Kirkegaard et al., 1994). El incremento en la impedancia mecánica del suelo bajo sistemas conservacionistas reduce el crecimiento de las raíces, con efectos negativos sobre el abastecimiento de agua y nutrientes por parte de los cultivos (Kirkegaard et al., 1994). Para asegurar un buen crecimiento y funcionamiento de las raíces, es necesario que el suelo provea una adecuada capacidad de almacenaje de agua, aire y además una resistencia o densidad apropiada.

Sin embargo, si se compara con el porcentaje de macro poros es congruente con el bajo nivel que se presenta en esta área que esta entre un 5 y 10%, el uso del suelo en esta zona es en su mayoría frutales que son irrigados principalmente con riego por goteo. Al mismo tiempo, la caracterización del proceso de conductividad hidráulica constituye uno de los parámetros básicos para el adecuado diseño y gestión de sistemas de riego en la agricultura de producción. La conductividad del agua en el suelo se produce a través de una combinación de direcciones de flujo, tanto vertical como horizontalmente (Orjuela et al., 2012).

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 (Hanks y Ashcroft, 1980). 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 (IGAC, 1990).

Al tener una relación directa con la estructura, nuevamente se empiezan a dar indicios de problemas estructurales que afectan el movimiento del agua en el suelo.

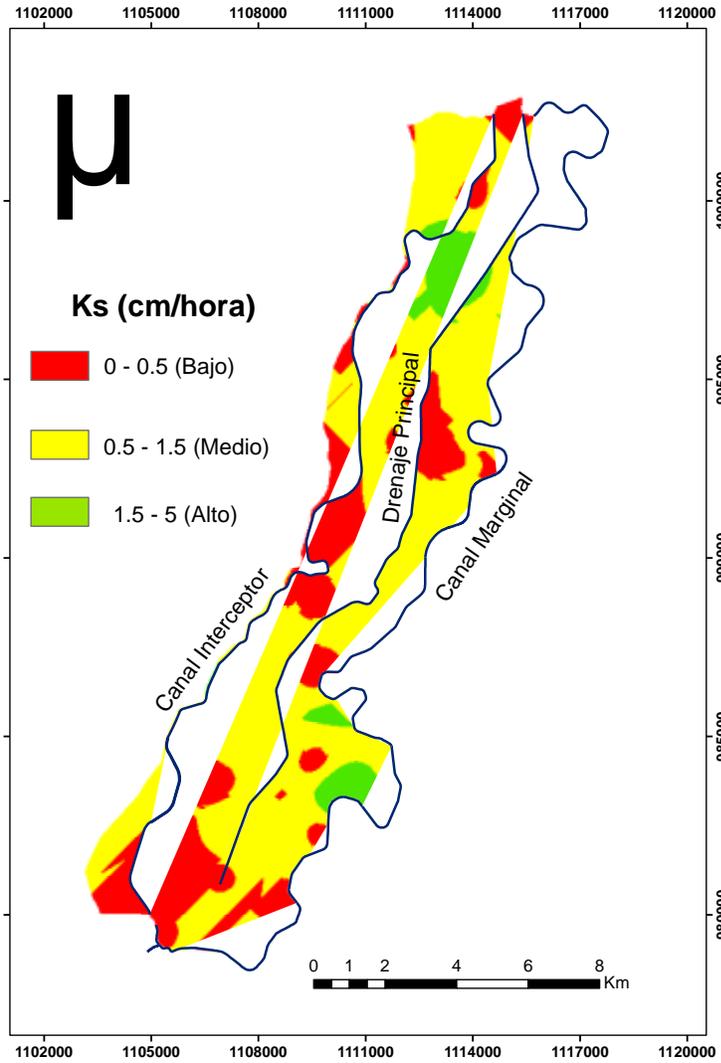
También se está presentando un área importante con afección en la zona centro del distrito en la zona 1D e inicios de la 3A y más hacia la zona del drenaje principal se presenta otra área en la zona 4A de menor tamaño, otro aspecto a tener en cuenta es que las zonas con mayor afección en la conductividad hidráulica, son zonas con influencia directa del pie de monte de la cordillera occidental.

La mayoría de estos suelos están constituidos por arcillas, por lo que son muy impermeables (fácilmente encharcables) y mal aireados, pues en ellos predominan los micro poros (IGAC-CVC, 2004).

Se debe tener en cuenta en este parámetro que según el estudio de IGAC, en el año 2004, esta área del Valle del Cauca, viene de un material parental de depósitos superficiales clásticos hidrogenicos (aluviones finos), en los cuales se presentan minerales como la Zeolita que tienden a deshidratarse y formar otros minerales, además se presentan esmectitas, que en su forma sódica se puede transformar en bentonita que tiende a llenarse de humedad y a impermeabilizar, lo que presumiblemente ayudaría a la baja conductividad, ya que según clasificación de IGAC, en las zonas presentes en el plano de Ks generado en este estudio, hay una afección ligera de sodio, lo que facilitaría esa interacción. En estudios anteriores se ha demostrado que durante la hidratación de la bentonita compactada, partículas se dividen a lo largo con la adsorción progresiva del agua en los poros micro y macro. El número de capas en una partícula tiende a reducirse de manera significativa durante la hidratación, formando partículas más pequeñas (Saiyouri et al., 2004). Tal alteración en la estructura de la arcilla puede afectar las propiedades de transporte del sistema suelo. Los estudios sobre el comportamiento hidráulico de la bentonita compactada han demostrado que teniendo en cuenta la totalidad de la porosidad, al modelar el flujo de la humedad puede dar lugar a discrepancias significativas entre

resultados de la simulación y el comportamiento observado (Sánchez et al., 2012; Villar et al., 2012).

Figura 4-7: Comportamiento Ks en el área RUT



4.5 Correlaciones

En esta sección se describirán las correlaciones encontradas entre los parámetros evaluados y las siguientes características relacionadas con las propiedades hidrodinámicas:

- Ordenes Taxonómicos.
- Porcentaje de Magnesio Intercambiable (PMgl).

4.5.1 Ordenes Taxonómicos

Tabla 4-5: Correlación Da y órdenes taxonómicos

<i>INTERPRETACION</i>	<i>Da</i> (<i>gr.cm⁻³</i>)	<i>ALFISOL</i> (<i>ha</i>)	<i>ENTISOL</i> (<i>ha</i>)	<i>INCEPTISOL</i> (<i>ha</i>)	<i>MOLISOL</i> (<i>ha</i>)	<i>VERTISOL</i> (<i>ha</i>)	<i>AREA TOTAL</i>
BAJA	0.9 - 1.1	0	0	57	4	0	61
MEDIA	1.1 - 1.4	105	44	7610	1952	701	10412
ALTA	1.4 - 1.65	42	5	121	342	41	551
AREA TOTAL		147	49	7788	2298	742	11024

La densidad aparente del suelo es un buen indicador de características importantes del suelo, como son: la compactación, porosidad, grado de aireación y capacidad de infiltración, lo que condiciona la circulación de agua y aire en el suelo, los procesos de establecimiento de las plantas (emergencia, enraizamiento) y el manejo del suelo (Rubio, 2010).

En la correlación entre ordenes taxonómicos y densidad aparente los alfisoles presentan un 28.6%, del área en la cual se presentan, con afecciones de densidad aparente, esta situación no presenta relación con la textura predominante en el distrito RUT, que es arcillosa, sin embargo puede tener alguna relación indirecta ya que por lo regular los suelos del Valle de inundación del río Cauca que corresponden a este orden taxonómico presentan horizontes sub superficiales enriquecidos con arcillas trasladadas de los horizontes superficiales (IGAC-CVC, 2004).

Otros factores que influyen en la compactación de los suelos son: bajos contenidos de materia orgánica, suelos desprotegidos, altas concentraciones de sodio y de otros agentes

dispersantes, historia antecedente de la humedad del suelo (Lal, 1996), el manejo de los suelos, los sistemas de cultivo y las condiciones climáticas (Voorhees, 1987).

Los molisoles con el 14.9% de su área, se encuentran en un segundo lugar en cuanto a afección por tendencia a la compactación, estos son suelos con altos contenidos de materia orgánica, muy fértiles, ricos en sales minerales, con saturación de bases mayor del 50% por lo que bajo condiciones inadecuadas de manejo pueden salinizarse (IGAC-CVC, 2004).

Presentan texturas pesadas con dominancia de arcillas por lo que, bajo condiciones de mecanización continua, tienden a amasarse y perder su estructura (IGAC-CVC, 2004). Son suelos muy productivos, sin embargo, también presentan fuertes limitaciones de uso relacionadas con sus propiedades vérticas, horizontes endurecidos, deterioro estructural, alta susceptibilidad a la erosión y salinización (IGAC-CVC, 2004).

La literatura señala un incremento de la compactación superficial bajo siembra directa, con disminuciones de la porosidad total y aumentos en la densidad aparente en la mayoría de los ensayos (Sasal et al., 2006; Mc Vay et al., 2006), e incrementos en la resistencia a la penetración con respecto a la tierra arada (Álvarez y Steinbach, 2009). Esta mayor densificación del suelo puede presentar problemas para el desarrollo de las raíces de los cultivos (Lattanzi et al., 2004).

Tabla 4-6: Correlación DPM y órdenes taxonómicos

<i>INTERPRETACION</i>	<i>DPM (mm)</i>	<i>ALFISOL (ha)</i>	<i>ENTISOL (ha)</i>	<i>INCEPTISOL (ha)</i>	<i>MOLISOL (ha)</i>	<i>VERTISOL (ha)</i>	<i>AREA TOTAL</i>
INESTABLE	0-0.5	0	0	1	0	0	1
LIG. ESTABLE	0.5-1.5	65	16	3421	1206	527	5235
MOD. ESTABLE	1.5-3.0	82	33	4366	1092	215	5788
AREA TOTAL		147	49	7788	2298	742	11024

Los valores más significativos en la relación estabilidad estructural y orden taxonómico están dados en el vertisol con un 71% de su área de presencia y el Molisol con un 52.5%, clasificados con un diámetro ponderado medio (DPM), ligeramente estable.

En el orden vertisol se puede explicar este comportamiento ya que son suelos muy arcillosos, con manifestaciones notorias de expansión al humedecerse y contracción al secarse, son bastante ricos en arcillas expansibles, lo que hace que este tipo de suelos se agriete en el momento de pérdida de humedad y que las grietas desaparezcan al humedecerse nuevamente, este comportamiento puede suponer una pérdida importante de estabilidad estructural (IGAC-CVC, 2004).

Para los molisoles con sus texturas pesadas y en cuya mineralogía predominan las arcillas y en la presencia de contenidos de humedad significativos, la mecanización continua, tienden a amasar y hacer perder la estructura de este tipo de suelos. Los molisoles en el Valle del río Cauca presentan fuertes limitaciones de uso relacionadas con sus propiedades vérticas, ya que se pueden presentar horizontes endurecidos, y deterioro estructural (IGAC-CVC, 2004).

La caracterización de la estructura puede realizarse mediante apreciaciones cualitativas (tipo, clase y grado de desarrollo de la estructura) y determinaciones cuantitativas (densidad aparente, porosidad, distribución de tamaños de poros) (Lobo y Pulido, 2010). Dado que la estructura del suelo es una condición compleja que está asociada a muchos procesos agronómicos y ambientales, es de particular importancia evaluar su estabilidad frente a fuerzas externas (gotas de lluvia, presiones mecánicas) e internas (fragmentación por explosión de aire atrapado como resultado de un rápido humedecimiento e hinchamiento diferencial) (Lobo y Pulido, 2010). La selección de los métodos de evaluación y la interpretación de los resultados depende del propósito de la medición (Lobo y Pulido, 2010).

Tabla 4-7: Correlación LAA y ordenes taxonomicos

<i>INTERPRETACION</i>	<i>LAA (cm.m⁻¹)</i>	<i>ALFISOL (ha)</i>	<i>ENTISOL (ha)</i>	<i>INCEPTISOL (ha)</i>	<i>MOLISOL (ha)</i>	<i>VERTISOL (ha)</i>	<i>AREA TOTAL</i>
MUY BAJA	0 - 5	0	0	91	8	4	103
BAJA	5 - 10	0	0	1349	184	156	1689
MEDIA	10 - 15	128	30	6109	1714	529	8510
ALTA	15 -20	19	13	239	392	53	716
AREA TOTAL		147	43	7788	2298	742	11018

El comportamiento de la lámina de agua aprovechable (LAA), relacionada con el orden taxonómico presentó valores bajos en los suelos del RUT, de 21% en vertisoles, respecto al área que presentan en la zona y 17.3% en inceptisoles, dados los comportamientos que se dan en las propiedades físicas de los vertisoles se guarda relación a la hora de la aprovechabilidad del agua por parte de las plantas, además combinado con el alto volumen de micro poros existente en los suelos del distrito. Domingo et al (2006) manifiestan que la capacidad de retención de agua en el suelo es un parámetro de base física utilizado por técnicos forestales e investigadores en ecología forestal del territorio español, como uno de los factores estimadores de las disponibilidades de agua para las plantas, la bondad de estos parámetros se contrasta mediante el análisis de correlaciones con resultados satisfactorios.

En el caso de los inceptisoles siendo un área más pequeña es igual importante que empieza a evidenciar la afectación física que limita el movimiento del agua en el suelo sobre todo en la referente a la disponible para las plantas, presumiblemente debida al deterioro de la estructura.

Así mismo, Martínez y Ceballos (2001) expresan que existen tres variables de predicción para estimar la humedad, tales como: las fracciones texturales, la densidad aparente y ocasionalmente la materia orgánica; estos autores afirman que los porcentajes de varianza explicada por las ecuaciones de regresión son siempre altos y que la bondad de las estimaciones, en términos de error medio y de raíz del error cuadrático medio, han sido muy satisfactorias.

Tabla 4-8: Correlación Ks y ordenes taxonomicos

<i>INTERPRETACION</i>	<i>Ks (cm.h⁻¹)</i>	<i>ALFISOL (ha)</i>	<i>ENTISOL (ha)</i>	<i>INCEPTISOL (ha)</i>	<i>MOLISOL (ha)</i>	<i>VERTISOL (ha)</i>	<i>AREA TOTAL</i>
BAJA	0 - 0.5	24	30	1404	793	345	2596
MEDIA	0.5 - 1.5	122	19	5559	1323	397	7420
ALTA	1.5 - 5.0	1	0	825	182	0	1008
AREA TOTAL		147	49	7788	2298	742	11024

En este parámetro se ratifican los inicios de problemas en el movimiento del agua en el suelo, sin embargo se dan valores entre bajos y medios en ordenes taxonómicos variados, de allí el vertisol presenta un 46.5% del área en el cual se presenta en el RUT con una conductividad hidráulica baja y 53.3% con conductividad hidráulica media, los molisoles

también presentan afecciones en los rangos bajos y medios con un 34.5% en niveles altos y 57.6% con niveles medios, del área en la cual se presentan en el distrito RUT, en el caso de los inceptisoles y alfisoles se dan niveles medios de conductividad hidráulica, 71.4% para inceptisoles y 83% para alfisoles. 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 (IGAC, 1990).

Estos datos en general ratifican las características marcadas de deterioro de vertisoles y molisoles dentro del área del RUT, sin embargo, en menor medida se empiezan a presentar procesos degradativos en los inceptisoles y alfisoles del área de estudio.

4.5.2 PMgl

Los suelos magnésicos se consideran una categoría especial de suelos afectados por sales y iones específicos que se caracterizan por alta saturación de magnesio en el complejo de cambio (PMgl > 40%) (Darab, 1994). En el mundo se han reconocido diferentes zonas de suelos con alta concentración de magnesio; en el valle del río Cauca, hay aproximadamente 116.872 hectáreas (Borrero et al., 1998).

Tabla 4-9: Correlacion PMgl y DPM

<i>INTERPRETACION</i>	<i>DPM (mm)</i>	<i>0 - 20 %</i>	<i>20 % - 40 %</i>	<i>> 40 %</i>	<i>AREA TOTAL</i>
INESTABLE	0 -0.5	0	0	1	1
LIG. ESTABLE	0.5 - 1.5	30	3440	1765	5235
MOD. ESTABLE	1.5 -3.0	5	3185	2598	5788
AREA TOTAL		35	6625	4364	11024

La correlación entre DPM y PMgl, marca aún más lo inferido de la relación de parámetros anterior ya que empieza a mostrar un deterioro en el grado de estructuración de los suelos, donde el 60% de los suelos que se consideran magnésicos presentan un grado de estabilidad moderado, mientras que los ligeramente magnésicos presentan 52% en el estado ligero y 48% en el estado moderado. Si el Mg dispersa las arcillas ese efecto debe manifestarse en una reducción de la proporción de agregados estables al agua y en aumento de los inestables en los suelos afectados por alta saturación de este ión (Mendoza

y Garcia, 1989). Cuando el Mg+2 alcanza saturaciones cercanas o mayores al 40% pueden deteriorar la estructura del suelo. El efecto directo o «específico» del Mg produce la expansión extrema de la capa de Stern en los suelos de arcillas vermiculíticas e illíticas, o inhibe la hidrólisis de las montmorillonitas y vermiculitas, con lo cual se promueven fuerzas repulsivas que desfloculan el plasma arcilloso, y desagregan la microestructura antes de que entre el Na, decreciendo así las propiedades hidrológicas (Emerson y Chi, 1977; Rahman y Rowell, 1979; Rowell y Shainberg, 1979; Alperovich et al., 1981; Shainberg et al., 1988; Keren, 1991; Quirk, 1994).

Tabla 4-10: Correlacion PMgl y LAA

<i>INTERPRETACION</i>	<i>LAA (cm.m⁻¹)</i>	<i>0 - 20 %</i>	<i>20 % - 40 %</i>	<i>> 40 %</i>	<i>AREA TOTAL</i>
MUY BAJA	0 - 5	0	47	56	103
BAJA	5 - 10	31	520	1144	1695
MEDIA	10 - 15	3	5461	3046	8510
ALTA	15 - 20	1	597	118	716
AREA TOTAL		35	6625	4364	11024

En cuanto a la humedad aprovechable en estos suelos se puede inferir de estas relaciones directas con el magnesio que se están empezando a ver impactos de este ion en las propiedades hidrodinámicas que tienen que ver directamente con el movimiento del agua en el suelo, en este caso el agua aprovechable, de allí se da que el 82% de los suelos ubicados en el rango de ligeramente magnésicos presentan condiciones medias, condición que comparten con el 70% de los suelos considerados magnésicos cuyo valor de porcentaje de magnesio intercambiable está por encima del 40%. Torrente et. al (2003), encontraron en estudios realizados que las curvas de tensión tendieron a ser planas, y que probablemente existe fuerte retención de la película de agua adyacente a la fracción mineral, restringiendo el flujo libre y la absorción de agua por el sistema radical de las plantas. Al desarrollar las funciones hidráulicas se presentaron flujos superficiales e internos de lentos a muy lentos, y alta retención de humedad (Torrente et.al, 2003).

El flujo restringido de agua se verificó por la escasa existencia de macroporos en los suelos, y los leves movimientos de las láminas de agua fueron probablemente producto de altos gradientes de potencial hídrico. El incremento del grado de saturación de Mg+2

estuvo estrechamente asociado con las deficientes propiedades físicas de estos suelos (Torrente et.al, 2003).

Tabla 4-11: Correlacion PMgl y Ks

<i>INTERPRETACION</i>	<i>Ks (cm.h⁻¹)</i>	<i>0 - 20 %</i>	<i>20 % - 40 %</i>	<i>> 40 %</i>	<i>AREA TOTAL</i>
BAJA	0 - 0.5	0	1569	1027	2596
MEDIA	0.5 - 1.5	26	4438	2956	7420
ALTA	1.5 - 5.0	9	618	381	1008
AREA TOTAL		35	6625	4364	11024

El 67% de los suelos ligeramente magnésicos y el 68% de los suelos ya considerados como magnésicos presentan condiciones medias en la conductividad hidráulica saturada, es decir presumiblemente empiezan a presentar problemas en el movimiento del agua en el suelo, lo que es un impacto muy negativo si se tiene en cuenta que el área de estudio se da en un distrito de riego, donde su principal recurso es el manejo de agua para riego de los diferentes cultivos allí establecidos. El efecto dispersante del Mg²⁺ en suelos disminuye la conductividad hidráulica (Alperovitch et al, 1981; Chi et al, 1977 y Rahman y Rowell, 1979). Debido a su tamaño el ión hidratado, separa las interláminas de las arcillas, dando origen a la dispersión afectando inicialmente las unidades estructurales y microagregados y al aumentar su concentración puede producir expansión. La expansión y la dispersión de las arcillas son una respuesta a la composición de electrolitos ya su concentración en la solución del suelo o en el agua de riego cambiando la geometría de los poros y afectando la conductividad hidráulica en forma determinante (Shainberg y Letey, 1984). En general, la conductividad hidráulica disminuye al disminuir la concentración de electrolitos debido a los fenómenos de dispersión y expansión de las arcillas. Estos son una respuesta a la composición de electrolitos y a su concentración en la solución del suelo o en el agua de riego cambiando la geometría de los poros (Shainberg y Letey, 1984). El desprendimiento y migración de partículas de arcillas durante flujos prolongados de agua puede traer como consecuencia el taponamiento de los poros.

5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones

- El almacenamiento de agua aprovechable en el primer perfil de los suelos en estudio dentro del distrito de riego RUT, se encuentra en general en valores medios (77.2%), lo cual puede obedecer al tipo de texturas predominantes en el área (arcillosa) en coherencia con la alta presencia de micro poros y bajo porcentaje de macro poros. El porcentaje de área con valores muy bajos de capacidad de almacenamiento es mínimo (0.9%). Un 15.3% del área tiene capacidad de almacenamiento clasificado como Bajo, y corresponde a zonas donde el PMgl es mayor a 40%, lo que supone otro problema de degradación en proceso. El movimiento interno del agua en los suelos del RUT, es lento lo que puede considerarse consecuencia de la baja presencia de macro poros y de la característica que presentan los vertic endoaquepts al encharcamiento que es la clase taxonómica con mayor presencia en el distrito RUT, con el 71 % del área total cultivable.
- Los suelos del orden taxonómico molisol e inceptisol son los que presentan mayores áreas con problemas incipientes por Densidad aparente, diámetro ponderado medio, lámina de agua aprovechable y conductividad saturada, lo que tiene relación directa con los parámetros medidos, lo que supone la degradación paulatina de las propiedades hidrodinámicas de los suelos cultivables del RUT y posiblemente estos factores estén teniendo una relación directa con los manejos excesivos e ineficientes de las aplicaciones de agua para riego.
- Este estudio presenta evidencia de dos procesos de degradación en el área de estudio. Uno por compactación en un área mínima, ubicada en el extremo norte del distrito RUT,

situación que puede ser potenciada por la alta presencia de micro poros, además de mecanización pesada e inadecuada en altas frecuencias y otro por disminución de capacidad de almacenamiento de agua, posiblemente por afectación de la estructura debida al PMgl, situación que se da en la mayor parte del distrito y que está afectando la demanda del recurso hídrico, situación preocupante ya que cada vez este recurso tiene una menor oferta en el sector agropecuario. La baja Ks no es evidencia clara de un proceso degradativo, posiblemente está asociado a la clase textural dominante en el distrito RUT y la alta tasa de micro porosidad.

- El análisis exploratorio de los datos indicó que todos los parámetros presentan relación geoespacial en la zona de estudio, es decir, se obtuvieron valores de proporción de varianza explicada mayores al 75%. En este caso fue usado el método geo estadístico Ordinary Kriging el cual ha sido usado por diferentes investigadores para modelar el comportamiento espacial de parámetros de suelo.

5.2 Recomendaciones

Tras la realización de este estudio se considera muy pertinente y de gran utilidad para la administración, operación, conservación y uso adecuado de la zona productiva que encierra el distrito RUT, por parte de los usuarios de los recursos suelo y agua, dar a conocer unas posibles acciones realizables a corto, mediano y largo plazo que impactarían positivamente en el sostenimiento y administración de dichos recursos no renovables y que sin ellos sería totalmente inútil la gran infraestructura civil e hidráulica construida en esta área.

Cada tipo de acción recomendada en este estudio debe tener un responsable directo en alguno de los grupos de trabajo que conforman la estructura operativa y administrativa que componen la simbiosis dada con los usuarios que utilizan el recurso suelo para la producción de los diferentes productos agrícolas que se siembran dentro del distrito, es por ello que las acciones se nombraran en los siguientes grupos de acciones: técnicas, formación de capacidades, administrativas, de diagnóstico y monitoreo.

Técnicas

- Realizar un estudio detallado donde se puedan realizar más puntos de muestreo del parámetro conductividad hidráulica que permita zonificar y caracterizar con una mayor exactitud las zonas problemáticas y de ventajas en el movimiento del agua.
- Llevar a cabo un muestreo con mayor densidad en aquellas zonas identificadas como problemáticas o con situaciones de afectación. Se sugiere realizar un muestreo con la siguiente densidad de muestreo: 1 muestra / 10 ha.
- Se recomienda llevar a cabo un estudio similar a una profundidad de 25 a 50 cm con el objetivo de evaluar la situación a mayor profundidad, dado que los sistemas radiculares de algunos cultivos de la zona presentan desarrollo hasta esa profundidad.
- Realizar mediciones y controles continuos a los sistemas de riego de los usuarios, teniendo en cuenta que el almacenamiento de agua aprovechable en el primer perfil de los suelos, se encuentra en valores medios (77.2%), estos datos técnicos pueden ser de utilidad para el mejor manejo del agua para riego, evitando sobre costos en el bombeo excesivo de agua para riego.
- Realizar un estudio en el que se pueda evidenciar el porcentaje de magnesio intercambiable (PMgI) con el comportamiento de la productividad de los diferentes productos establecidos dentro del distrito RUT.
- Reglamentar el uso de maquinaria agrícola pesada dentro de las zonas que se evidencia tienen problemas de compactación de suelos, como medida inicial de mitigación del problema, estas zonas son: 3A-3B-4A-4B-5A.

Formación de Capacidades

- Debe Capacitarse a los inspectores de riego en el monitoreo de las características más importantes de los suelos, además de instruirlos en dichas características para que sirvan como interlocutores primarios con los usuarios, para observar y evitar problemas en sus sistemas productivos.
- Capacitar a los usuarios en fertilización y manejo de cultivos, dándoles a conocer la relación existente entre las características físicas del suelo, movimiento del agua y la vulnerabilidad a la salinización por fertilización, prácticas que mal realizadas pueden ser anti económicas y que lejos de mejorar las producciones las afecta y afectan un recurso no renovable como lo es el suelo.
- Capacitar a los usuarios en el manejo integral de los suelos.

- Capacitar a los usuarios en el manejo adecuado de los sistemas de riego.
- Capacitar e incentivar a los usuarios en la adecuación predial teniendo en cuenta que el movimiento interno del agua en los suelos del RUT es lento, lo que puede considerarse un grave problema en los suelos para cultivos comerciales y que puede marcar la diferencia en las productividades, además puede marcar la tendencia de algunos cultivos a la afección de hongos y bacterias por la poca aireación de las raíces, consecuencia de la baja presencia de macro poros y de la característica que presentan los vertic endoaquepts al encharcamiento que es la clase taxonómica con mayor presencia en el distrito RUT, con el 71 % del área total cultivable.

Administrativas

- Reglamentar el uso del suelo, acción de especial atención debido a que no es fácil hacer entender a los usuarios, que el suelo tiene características que pueden ser potencializadas y transmitidas a los rendimientos de los cultivos o por el contrario pueden deteriorar y afectar las producciones agrícolas. En este sentido debe tenerse en cuenta que el 5% de la zona nor- occidental del distrito ya presenta problemas de estabilidad de agregados por lo que se podría decir que ya hay un deterioro físico en algunas zonas del distrito RUT.
- Incentivar la realización de estudios de suelos a nivel predial por parte de los usuarios.
- Implementar el manejo específico por sitio con sistemas de información geográfica, en este caso podría ser por zona, ya que esto sería una gran herramienta de planificación, control y desarrollo para la asociación.
- Adquirir herramientas que permitan monitorear las condiciones hidroclimatológicas dentro de la zona RUT.
- Crear y sostener un departamento técnico que se dedique a los suelos productivos del distrito RUT.
- Incentivar la investigación con la formación de alianzas académicas con universidades nacionales e internacionales y demás entidades en el ámbito científico que permitan potencializar las características de la zona y formar un centro de estudio que sirva a toda la comunidad académica del país.

Diagnóstico y Monitoreo

- Realizar un monitoreo periódico de los valores de PMgI, que permitan realizar seguimientos de afectación por este ion. Se sugiere un monitoreo máximo cada dos años.
- Realizar la caracterización detallada de las actividades de fertilización de los usuarios del distrito RUT e iniciar planes de manejo más adecuados, según las áreas y cantidades de afección por magnesio.
- Realizar un monitoreo constante de la calidad de agua para riego distribuida dentro del distrito RUT, ya que los altos contenidos de magnesio en el suelo pueden ser una consecuencia directa de la aplicación del riego con aguas que contengan altos niveles de este ion.
- Realizar la programación de los riegos a través de elementos técnicos como lo son el balance hídrico y demás elementos que permitan mejorar el manejo del recurso hídrico.

A. Anexo: Ubicación Puntos de Muestreo (0-50).

Propiedades Hidrodinámicas del Suelo en el Distrito RUT

Número Papel	Código Predio Rut	Nombre del Predio	Propietario	Municipio
1	5A4170	HDA BUENOS AIRES	INGENIO RISARALDA S.A.	TORO
2	3B2150	SANTA CATALINA	AGROPECUARIA EL NILO LTDA.	TORO
3	4B1590	LA PEPA	VILLEGAS JARAMILLO MARIO	TORO
4	4B1870	PORTUGAL	NISHI SHIGETOMI ARMANDO	TORO
5	5A4150	EL PALMAR	GOMEZ JARAMILLO JOAQUIN EMILIO	TORO
6	5A4270	LA MARIA	GALLEGO DORIS LOAIZA DE	TORO
7	3B2050	LA GUAJIRA	PALACIO VILLEGAS Y CIA S. EN C	TORO
8	5A3990	SANTA MONICA	INGENIO RISARALDA S.A.	TORO
9	4B1570	EL EDEN	SOTO ECHEVERRY LIMITADA	TORO
10	3B1520	LA PUNTA NUMERO	OROZCO YOLANDA GOMEZ DE	TORO
11	3B1650	LA ROSALBA	CARDONA MARLENY DE	LA UNION
12	3B1550	LA FRUTERA 1	SOCIEDAD ARNAOS S.A.S.	LA UNION
13	2D9070	EL LINDERO	ARISTIZABAL SANDRA ISABEL	LA UNION
14	3B1540	LA PUNTA	VILLEGAS GRETCHEN SCHNEPEZ DE	LA UNION
15	4A1490	LA LINDA	APARICIO PIEDRAHITA JAIME A.	LA UNION
16	3A0270	EL REFLEJO	GARCIA B MARIA ADELINA	LA UNION
17	3A0280	EL REFLEJO	BEDOYA GARCIA MANUEL SALVADOR	LA UNION
18	3A0840	BELLAVISTA	BORJA CABEZAS CAMPO ELIAS	LA UNION
19	3A1190	LAS BALINES	BOHORQUEZ LEONIDAS ANTONIO	LA UNION
20	4A0530	DIAMANTE	GOMEZ HECTOR NELSON Y OTRA	LA UNION
21	3A0240	EL RODEO	RENTERIA A. EDUARDO ANTONIO	LA UNION
22	3A0250	BALZAR GRANDE	RENTERIA A EDUARDO ANTONIO	LA UNION
23	3A0670	BELLAVISTA	ARISTIZABAL LUCILA A. DE Y OTR	LA UNION
24	3A0190	EL ENCANTO	MONCADA ARISTIZABAL JHON JAIRO	LA UNION
25	3A0170	MATEGUADUA	INGENIO RISARALDA S.A.	LA UNION
26	5A3770	EL HOBO	GORDILLO ISAURA VELEZ DE	LA UNION
27	3A0550	TEJEDA	INGENIO RISARALDA S.A.	LA UNION
28	3A0120	EL PALMAR	SOC. ALBERTO ARISTIZABAL Y CIA	LA UNION
29	3A0490	LA SIRIA	ESCOBAR GOMEZ GONZALO	LA UNION
30	5A3600	EL PALMAR	MURIEL EPIFANIO	LA UNION
31	4A0720	LA ESPERANZA	GIRALDO ROJAS HERMANOS	LA UNION
32	4A0710	LA SARITA	RIOS PRADO LTDA	LA UNION
33	4A0940	LAS PLAYAS	GARCIA B SALUSTIANO	LA UNION
34	3A0040	VILLA IVONE	PEREA H. JAIME ARTURO Y HNOS.	LA UNION
35	4A0580	EL NARANJO	CARRILLO NIVIA LUISA F.	LA UNION
36	2D9110	LA GUAYANA	MARMOLEJO DEMETRIO	LA UNION
37	1D366A	EL PALMARCITO	ARISTIZABAL SANCHEZ PAOLA	LA UNION
38	1D3690	LA CEIBA	SOC. ALBERTO ARISTIZABAL Y CIA	LA UNION
39	2D8990	LA VILLA	BOCANEGRA GALLEGO IVAN RENE	LA UNION
40	1D378C	SAN ANTONIO II	GORDILLO VARELA BERTHA LUCIA	LA UNION
41	1D3560	LA RAFAELA	MURIEL MURILLO ADALBERTO	LA UNION
42	2D8720	LA GALICIA	GIRALDO MEJIA JULIO ANIBAL	LA UNION
43	1D3610	SAN JUANITO	GRAJALES HERMANOS LTDA	LA UNION
44	1D3850	LUCITANIA I	SANCHEZ GUTIERREZ RUBY	LA UNION
45	1C3390	LA PLAYITA	MONTOYA MALDONADO OSCAR	LA UNION
46	1D3630	HDA. CONTADORA	TORRES TITO HERNAN Y OTRA	LA UNION
47	1D4230	HDA. QUISQUELLA	PROD. HIDROAGROPECUARIOS LTDA.	LA UNION
48	1C3350	EL RECREO	BERMUDEZ VARELA LUCIA	LA UNION
49	1C3420	EL REFUGIO	ESCARRIA RUIZ REINEL	LA UNION
50	1C3410	LA JOTA	RESTREPO JARAMILLO CARLOS H.	LA UNION

B. Anexo: Ubicación Puntos de Muestreo (51-100).

Número Papel	Código Predio Rut	Nombre del Predio	Propietario	Municipio
51	1D4210	EL ANHELO	SOCIEDAD PALOMINOS LTDA	LA UNION
52	1C2810	BOJACA	ESCARRIA RUIZ CIRO	LA UNION
53	1C2320	EL CONSUELO	CUELLAR C LILIA	ROLDANILLO
54	1C2880	LA REDONDA	ESCARRIA RUIZ REINEL	ROLDANILLO
55	1C2910	GUASIMAL	POSSO JOAQUIN E SUC	ROLDANILLO
56	2D7200	EL MANGON	MORENO GARCIA EDUARDO	ROLDANILLO
57	1C2120	SAN ISIDRO	POSSO ARIAS SEGUNDO	ROLDANILLO
58	2C6300	CONCHAL	GARCIA CAMPO ABSALON	ROLDANILLO
59	1C2270	SAN JORGE	JARAMILLO TORO FELIPE	ROLDANILLO
60	2C5650	PERIGORRON	ESCARRIA RUIZ CIRO	ROLDANILLO
61	2C4980	LA FLORESTA	OSORIO RAMIREZ GLORIA MARY	ROLDANILLO
62	1B1760	PUENTE GRANDE	VARELA G GILBERTO	ROLDANILLO
63	2C5620	LA CLINICA	QUINTANA YUSTY SAUL	ROLDANILLO
64	1B1670	EL ESTERO	JARAMILLO MORENO MIGUEL	ROLDANILLO
65	1B190B	LA ESPERANZA	RAMIREZ OTILIA GARCIA DE	ROLDANILLO
66	1C3020	LA MERCEDES	LLANOS VALDERRAMA ELENA DE	ROLDANILLO
67	2C5590	LA GRANJA	AGUADO GARCIA ALFREDO	ROLDANILLO
68	2C5040	LA CARMELITA	ESCOBAR M JOSE OCTAVIO	ROLDANILLO
69	1B1810	LA CRISTALINA	SOCIEDAD FADETRAP S.A.S	ROLDANILLO
70	1B1610	GARRUCHAL	ANDRADE LIBREROS JAIME	ROLDANILLO
71	2C5280	YARUMAL	GARCIA LUZ MARY VALENCIA DE	ROLDANILLO
72	1B189A	LA NATALIA	GIRALDO HOLGUIN HECTOR	ROLDANILLO
73	1B1790	EL PITAL	SOC. G.G BERNAL E HIJOS LTDA	ROLDANILLO
74	1B1280	IYOMA	AGROPECUARIA IYOMA LTDA	ROLDANILLO
75	2B4500	ALEJANDRIA	MEJIA JARAMILLO JESUS	ROLDANILLO
76	1B110A	PARCELA N.3	MILLAN GARCIA NICOLAS	ROLDANILLO
77	1B1770	SAN BERNARDO	SOC. G.G BERNAL E HIJOS LTDA	ROLDANILLO
78	1B1300	EL PITAL	ROMERO PEDRO NEL	ROLDANILLO
79	2B2210	LA ISABELA	MORALES GARCIA ALVARO	ROLDANILLO
80	5A1050	SANTA ANA	MULLER LYDIA ESTEFAN DE	ROLDANILLO
81	1B1080	LA NAVARRA	LOPEZ SALAZAR ALBERTO	ROLDANILLO
82	1B1070	EL MOLINO	GONZALEZ DANIEL SUC	ROLDANILLO
83	1B1250	MONTE NO 2-LUISA	REBOLLEDO MA LUISA	ROLDANILLO
84	2A2450	PEOR ES NADA	CASTA PRODUCCIONES Y CIA	ROLDANILLO
85	2A1350	LA PONDEROSA	CABAL M. CRISANTO ALFONSO	ROLDANILLO
86	5A2410	SANJON HONDO	VALDERRAMA ERNESTINA	ROLDANILLO
87	2A2050	QUEREMAL	AGUILAR MANUEL DE J	ROLDANILLO
88	2A2390	NUCLEO VIVIENDA	INCORA	ROLDANILLO
89	1A0770	PALMAMOCHA	RODRIGUEZ NUÑEZ GREGORIO	ROLDANILLO
90	2A1000	DIAMANTE 1 Y 2	VILLAQUIRAN TERAN HERNANDO	ROLDANILLO
91	5A2040	CANAGUAY	MEJIA JARAMILLO RICARDO	ROLDANILLO
92	1A0650	BARROHONDO	GARCIA VARELA JESUS	ROLDANILLO
93	2A0980	BELLAVISTA	ESTRADA VIRGINIA LONDOÑO	ROLDANILLO
94	5A1910	EL FORTIN	VALDERRAMA VARELA	ROLDANILLO
95	2A0770	LA CAMPINA 2	REBOLLEDO LOPEZ CARLOS A,	ROLDANILLO
96	1A0010	PARCELA 4	VACCA ANA MARIA GOMEZ DE	ROLDANILLO
97	2A0780	LA REDONDA	ROJAS CARLOS ARTURO	ROLDANILLO
98	2A0700	ISUGU	VON BREMEN CARLOS E HIJOS	ROLDANILLO
99	1A0950	LA ISABEL	AYALA C LUIS ALFONSO	ROLDANILLO
100	2A0350	PARCELA 9	REYES RAMIREZ CLARA	ROLDANILLO

C. Anexo: Taxonomía Puntos de Muestreo (0-35 puntos).

NUMERO	Código	Orden Taxonómico	Taxonomía	Textura	cod_su2004
1	1A0010	Molisol	Vertic Haplustolls	Arcilloso	RTar
2	1A0650	Vertisol	Sodic Haplusterts	Arcilloso	BAakr
3	1A0770	Inceptisol	Vertic Haplustepts	Arcilloso	LEaxr
4	1A0950	Molisol	Vertic Haplustolls	Arcilloso	RTar
5	1B1070	Molisol	Vertic Haplustolls	Arcilloso	RTar
6	1B1080	Molisol	Vertic Haplustolls	Arcilloso	RTar
7	1B110A	Vertisol	Sodic Haplusterts	Arcilloso	BAakr
8	1B1250	Inceptisol	Vertic Haplustepts	Arcilloso	LEaxr
9	1B1280	Inceptisol	Vertic Endoaquepts	Arcilloso	(LM-EV)ar
10	1B128A	Inceptisol	Vertic Haplustepts	Arcilloso	LEaxr
11	1B1610	Inceptisol	Vertic Endoaquepts	Arcilloso	(LM-EV)ar
12	1B1670	Molisol	Vertic Haplustolls	Arcilloso	RTar
13	1B1760	Inceptisol	Vertic Haplustepts	Arcilloso	LEayr
14	1B1770	Inceptisol	Vertic Haplustepts	Arcilloso	LEaxr
15	1B1790	Inceptisol	Vertic Haplustepts	Arcilloso	LEaxr
16	1B1810	Inceptisol	Vertic Endoaquepts	Arcilloso	(LM-EV)ar
17	1B189A	Inceptisol	Vertic Endoaquepts	Arcilloso	(LM-EV)ayxr
18	1B190B	Inceptisol	Vertic Haplustepts	Arcilloso	LEaxr
19	1C2120	Molisol	Vertic Haplustolls	Arcilloso	RTar
20	1C2270	Molisol	Vertic Haplustolls	Arcilloso	RTar
21	1C2320	Molisol	Pahic Haplustolls	Franco Arcilloso	(NM-SN)b
22	1C2810	Inceptisol	Vertic Haplustepts	Arcilloso	LEar
23	1C2880	Inceptisol	Vertic Endoaquepts	Arcilloso	(LM-EV)ayxr
24	1C2910	Inceptisol	Vertic Haplustepts	Arcilloso	LEar
25	1C3020	Molisol	Vertic Haplustolls	Arcilloso	RTar
26	1C3350	Vertisol	Udic Calciusterts	Arcilloso	GLar
27	1C3390	Vertisol	Udic Calciusterts	Arcilloso	GLar
28	1C3410	Vertisol	Udic Calciusterts	Arcilloso	GLar
29	1C3420	Inceptisol	Vertic Endoaquepts	Arcilloso	(LM-EV)ar
30	1D3560	Inceptisol	Vertic Haplustepts	Arcilloso	LEakr
31	1D3610	Vertisol	Udic Calciusterts	Arcilloso	GLar
32	1D3630	Inceptisol	Vertic Endoaquepts	Arcilloso	(LM-EV)ar
33	1D366A	Vertisol	Udic Calciusterts	Arcilloso	GLar
34	1D3690	Inceptisol	Vertic Endoaquepts	Arcilloso	(LM-EV)axr
35	1D378C	Inceptisol	Vertic Endoaquepts	Arcilloso	(LM-EV)ar

D. Anexo: Taxonomía Puntos de Muestreo (36-70 puntos).

NUMERO	Código	Orden Taxonómico	Taxonomía	Textura	cod_su2004
36	1D3850	Inceptisol	Vertic Endoaquepts	Arcilloso	(LM-EV)axr
37	1D4210	Inceptisol	Vertic Endoaquepts	Arcilloso	(LM-EV)ar
38	1D4230	Inceptisol	Vertic Endoaquepts	Arcilloso	(LM-EV)axr
39	2A0350	Inceptisol	Fluventic Haplustepts	Franco	CKa
40	2A0700	Vertisol	Sodic Haplusterts	Arcilloso	BAakr
41	2A0770	Vertisol	Sodic Haplusterts	Arcilloso	BAakr
42	2A0780	Vertisol	Sodic Haplusterts	Arcilloso	BAakr
43	2A0980	Inceptisol	Vertic Endoaquepts	Arcilloso	(LM-EV)ar
44	2A1000	Inceptisol	Vertic Endoaquepts	Arcilloso	(LM-EV)axr
45	2A1350	Inceptisol	Fluventic Haplustepts	Franco	CKa
46	2A2050	Inceptisol	Fluventic Haplustepts	Franco	CKa
47	2A2390	Inceptisol	Vertic Endoaquepts	Arcilloso	(LM-EV)axr
48	2A2450	Inceptisol	Vertic Endoaquepts	Arcilloso	(LM-EV)ar
49	2B2070	Inceptisol	Fluventic Haplustepts	Franco	CKa
50	2B4500	Inceptisol	Vertic Endoaquepts	Arcilloso	(LM-EV)ar
51	2C4980	Inceptisol	Vertic Haplustepts	Arcilloso	LEar
52	2C5040	Inceptisol	Fluventic Haplustepts	Franco	CKa
53	2C5280	Inceptisol	Vertic Endoaquepts	Arcilloso	(LM-EV)ar
54	2C5590	Inceptisol	Vertic Endoaquepts	Arcilloso	(LM-EV)ar
55	2C5620	Inceptisol	Vertic Haplustepts	Arcilloso	LEayr
56	2C5650	Molisol	Vertic Haplustolls	Arcilloso	RTar
57	2C6300	Molisol	Vertic Haplustolls	Arcilloso	RTar
58	2D7200	Inceptisol	Vertic Endoaquepts	Arcilloso	(LM-EV)ar
59	2D8720	Inceptisol	Vertic Endoaquepts	Arcilloso	(LM-EV)axr
60	2D8990	Inceptisol	Vertic Endoaquepts	Arcilloso	(LM-EV)axr
61	2D9070	Inceptisol	Vertic Endoaquepts	Arcilloso	(LM-EV)ar
62	2D9110	Inceptisol	Vertic Haplustepts	Arcilloso	LEar
63	3A0040	Vertisol	Udic Calciusterts	Arcilloso	GLar
64	3A0120	Inceptisol	Vertic Endoaquepts	Arcilloso	(LM-EV)ar
65	3A0170	Inceptisol	Vertic Endoaquepts	Arcilloso	(LM-EV)ayr
66	3A0190	Inceptisol	Vertic Endoaquepts	Arcilloso	(LM-EV)ayr
67	3A0240	Inceptisol	Vertic Endoaquepts	Arcilloso	(LM-EV)ayr
68	3A0250	Inceptisol	Vertic Endoaquepts	Arcilloso	(LM-EV)ayr
69	3A0270	Inceptisol	Vertic Endoaquepts	Arcilloso	(LM-EV)ayr
70	3A0280	Inceptisol	Vertic Endoaquepts	Arcilloso	(LM-EV)ayr

E. Anexo: Taxonomía Puntos de Muestreo (71-100 puntos).

NUMERO	Código	Orden Taxonómico	Taxonomía	Textura	cod_su2004
71	3A0490	Inceptisol	Vertic Endoaquepts	Arcilloso	(LM-EV)ar
72	3A0550	Inceptisol	Vertic Endoaquepts	Arcilloso	(LM-EV)ar
73	3A0670	Inceptisol	Vertic Endoaquepts	Arcilloso	(LM-EV)ayr
74	3A0840	Inceptisol	Vertic Endoaquepts	Arcilloso	(LM-EV)ayr
75	3A1190	Inceptisol	Vertic Endoaquepts	Arcilloso	(LM-EV)ar
76	3B1520	Molisol	Cumulic Haplustolls	Arcilloso	(CU-MN)a
77	3B1540	Inceptisol	Vertic Haplustepts	Arcilloso	LEar
78	3B1550	Molisol	Cumulic Haplustolls	Arcilloso	(CU-MN)a
79	3B1570	Molisol	Pahic Haplustolls	Arcilloso	SNab
80	3B2050	Inceptisol	Vertic Endoaquepts	Arcilloso	(LM-EV)ar
81	3B2150	Vertisol	Chemic Endoaquerts	Arcilloso	(RJ-PO)ar
82	4A0530	Inceptisol	Vertic Endoaquepts	Arcilloso	(LM-EV)ayr
83	4A0580	Inceptisol	Vertic Haplustepts	Arcilloso	LEar
84	4A0710	Inceptisol	Vertic Endoaquepts	Arcilloso	(LM-EV)ar
85	4A0720	Inceptisol	Vertic Haplustepts	Arcilloso	LEakr
86	4A0940	Inceptisol	Fluventic Haplustepts	Franco	CKa
87	4A1490	Inceptisol	Vertic Endoaquepts	Arcilloso	(LM-EV)ar
88	4B1570	Inceptisol	Fluventic Haplustepts	Franco	CKa
89	4B1590	Inceptisol	Vertic Endoaquepts	Arcilloso	(LM-EV)ar
90	4B1870	Inceptisol	Vertic Endoaquepts	Arcilloso	(LM-EV)ar
91	5A1050	Inceptisol	Vertic Endoaquepts	Arcilloso	(LM-EV)ayxr
92	5A1910	Molisol	Vertic Haplustolls	Arcilloso	RTar
93	5A2040	Molisol	Vertic Haplustolls	Arcilloso	RTar
94	5A2410	Molisol	Vertic Haplustolls	Arcilloso	RTar
95	5A360	Vertisol	Udic Calciusterts	Arcilloso	GLar
96	5A3770	Molisol	Pahic Haplustolls	Arcilloso	SNb
97	5A3990	Molisol	Cumulic Haplustolls	Arcilloso	(CU-MN)a
98	5A4150	Inceptisol	Vertic Endoaquepts	Arcilloso	(LM-EV)ar
99	5A4170	Molisol	Cumulic Haplustolls	Arcilloso	(CU-MN)a
100	5A4270	Molisol	Cumulic Haplustolls	Arcilloso	(CU-MN)a

6. Bibliografía

AGER INGENIEROS. Ingeniería rural y civil. (2003). Los sistemas de información geográfica, características y aplicaciones generales. 2-3 p.

ALCONADA, M. (1996). Deterioro físico-químico de un Vertisol con cultivos protegidos en el partido de La Plata, Bs. As., Argentina. Actas XIII Congreso Latinoamericano Ciencia del Suelo. Brasil. Versión electrónica.

ALCONADA. M Y HUERGO. L. (1998). Degradación de suelos con cultivos protegidos: Tomate. Influencia de la calidad de agua de riego. Universidad Nacional de Tucumán. Argentina.

ALCONADA. M Y MINGHINELLI. F (1998). Calidad del agua de riego según diferentes criterios: su influencia sobre la salinización – alcalinización de suelos con cultivos protegidos en el Gran La Plata. XVI° Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Carlos Paz, Argentina, 4 - 7 mayo, p. 229- 230.

ALPEROVITCH, N.; SHAINBERG, I.; KEREN, R. (1981). Specific effect of magnesium on the hydraulic conductivity of sodic soils. J. Soil Sci. 32:543-554.

ÁLVAREZ, R Y HS STEINBACH. (2009). A review of the effects of tillage systems on some soil physical properties, water content, nitrate availability and crop yield in the Argentine Pampas. Soil Till. Res. 104: 1-15.

AMÉZQUITA, E. (1998). Propiedades Físicas de los Suelos de los Llanos Orientales y sus Requerimientos de Labranza. En: Memorias Encuentro Nacional de Labranza de Conservación. Romero G. et al editores. Villavicencio. pp: 145 – 174.

AMÉZQUITA E. Y CHÁVEZ L,F.(1999). La compactación del suelo y sus efectos en la productividad. Congreso Costarricense de la Ciencia del Suelo, San José, Costa Rica.

AMIOTTI, N; VILLAMIL. M.B Y DARMONY. R.G. (2012). Agronomic and taxonomic consequences of agricultural use of marginal soils in Argentina. Soil Sci. Soc. Am. J. 76: 558-568.

ANDREAU. R; GELATI. P; PROVAZA. M; BENNARDI. D; FERNÁNDEZ.D; VÁZQUEZ.M. (2012). Degradación física y química de dos suelos del cordón hortícola platense. alternativas de tratamiento.

BAQUERO M. (2011). Estudio de los efectos troposféricos en la precisión de mediciones con GPS en el suroccidente colombiano. Universidad del Valle. Cali Colombia.

BARIK K. et al. (2013). La variabilidad espacial de las propiedades de compactación del suelo asociada con las operaciones de tráfico de campo.

BORMANN, H. (2010). Towards a hydrologically motivated soil texture classification. Geoderma 157, 42-153.

BORRERO, J; GARCÍA, A. Y GÓMEZ, C.A. (1998). Suelos afectados por magnesio en el valle del río Cauca. Suelos Ecuatoriales. Vol. 28.p.104.

BRAVO C. et al. (2007). Variabilidad espacial de propiedades físicas y químicas del suelo y su relación con el rendimiento de frijol (*Vigna unguiculata* L.) en una parcela experimental de los llanos centrales Venezolanos.

BRONICK C. J.; LAL. R (2004). Soil structure and management: a review. Geoderma: 124:3-22.

CAMERON, K.C., BUCHAN, G.D., (2006). Porosity and pore size distribution. In: Lal, R. (Ed.),

CASSARO, F.A.M., BORKOWSKI, A.K., PIRES, L.F., SAAB, S.D.C., (2011). Characterization of a Brazilian clayey soil submitted to conventional and no-tillage management practices using pore size distribution analysis. *Soil Tillage Res.* 111, 175–179.

CERDA A. (2000). Aggregate stability against water forces under different climates on agriculture land and scrubland in southern Bolivia. *Soil Till. Res.* 57: 159–166.

CHI, C.; EMERSON, W. AND LEWIS, D. C.(1977). Exchangeable calcium and the dispersion of illites in water. Characterization of illites and exchange reactions. *Aust. J. Soil Res.* 15: 243-253.

CHICAS SOTO, R.A, VANEGAS CHACÓN, E.A, GARCÍA ÁLVAREZ, N. (2014). *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, Vol. 23, No. 1 (pp. 41-46),

CHIEN Y., LEE D., GUO, H. and HOUNG, K. (1997). Geostatistical analysis of soil properties of mid-west Taiwan soils. *Soil Science* 162 (4): 291-298.

COMISIÓN DE LAS COMUNIDADES EUROPEAS. (CCE). (2002). Hacia una estrategia temática para la protección del suelo. *Edafología*, 9. (2). 213-250.

CORTÉS, A. y D. MALAGÓN. (1984). Los levantamientos agrológicos y sus aplicaciones múltiples. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Bogotá. 360 p.

COSTA E. S., DE OLIVEIRA. DE SOUZA, G. C, DIAS J. M., DE OLIVEIRA L. F. C., DE CASTRO M. B. (2008) “Pressão de preconsolidação e intervalo hídrico ótimo como indicadores de alterações estruturais de um latossolo e de um cambissolo sob cana-de-açúcar”, *R. Bras. Ci. Solo*, 32:1419-1427.

DA COSTA, P.A., MOTA, J.C.A., ROMERO, R.E., FREIRE, A.G., FERREIRA, T.O., (2014). Changes in soil pore network in response to twenty-three years of irrigation in a tropical semiarid pasture from northeast Brazil. *Soil Tillage Res.* 137, 23–32.

DARAB, K. (1994). Magnesium in salt affected soils. *Agrokemia es Talajtan*. Vol. 43. (1-2): 133-158.

DEXTER, AR. (1988). Advances in characterization of soil structure. *Soil Till. Res.* 11: 199-235.

DEXTER, AR. (2004). Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma* 120: 201-214.

DIAZ, VIERA.M. (2002). *Geo estadística Aplicada*. Instituto de Geofísica. UNAM. México.

DÍAZ-ZORITA, M; DUARTE.GA Y GROVE. JH (2002). A review of notill systems and soil management for sustainable crop production in the subhumid and semiarid Pampas of Argentina. *Soil Till. Res.* 65: 1-18.

DOMINGO, J.; FERNÁNDEZ .E. (2006). Estimación de la capacidad de retención de agua en el suelo, Ed. Departamento de Ciencias Agroforestales. Universidad de Huelva, España.

DONOSO ZEGERS, C. (1992) *Ecología forestal*. Editorial Universitaria, Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile.

DORAN, JW Y PARKIN. BT (1994). Defining soil quality for a sustainable environment. *Soil Sci. Soc. Am., Inc. Special Publication*. Number 35. Madison, Wisconsin, USA.

EMERSON, W.; CHI, C. L. (1977). Exchangeable calcium, magnesium, and sodium and the dispersion of illite in water. *Dispersion of illite in water. Aust. J. Soil Res.* 15:255-262. *Encyclopedia of Soil Science*. CRC Press, Boca Raton, FL, USA, pp. 1350–1353.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (AEMA), (2002). Copenhagen.

FAO, UNEP Y UNESCO, (1980). *Metodología Provisional para la Evaluación de la Degradación de los Suelos*. Roma.

FAO-PNUMA. Directrices para el control de la degradación de los suelos. 1984, Roma.

GABIOUD, EA; WILSON MG Y SASAL. MC (2011). Análisis de la estabilidad de agregados por el método de Le Bissonnais en tres órdenes de suelos. *Ciencia del Suelo* 29(2) 129-139.

GARCIA, A. (2013). Manejo de la degradación del suelo. *Ciencias del suelo. Principios básicos. Segunda edición. Sociedad colombiana de la ciencia del suelo. Bogotá, Colombia.* pág. 337 - 341.

GARCIA, A. (2013). Manejo de la degradación del suelo. *Ciencias del suelo. Principios básicos. Segunda edición. Sociedad colombiana de la ciencia del suelo. Bogotá, Colombia.* pág. 311.

GARCIA, A. (2013). Manejo de la degradación del suelo. *Ciencias del suelo. Principios básicos. Segunda edición. Sociedad colombiana de la ciencia del suelo. Bogotá, Colombia.* pág. 323

GARCIA M. (2004). Aplicaciones de la geo estadística en las ciencias ambientales. *Departamento de expresión geográfica.* 79p.

GARCÍA, J. (1991). Efectos del laboreo en algunas propiedades físicas de los suelos Algodoneros del valle medio del Sinú. *Suelos Ecuatoriales.* 21(1): 51-54.

GIRALDO, H.R. (2009). *Estadística Espacial.* Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.

GUATIBONZA M. et al. (2008). Distribución espacial de la conductividad hidráulica en un lote de la granja Tinguavita (Paipa, Colombia).

GUDELJ. O y MASIERO. B. (2000). Efecto del manejo del suelo sobre su estabilidad estructural. *Mar del Plata. Argentina.*

GUÉRIF, J; RICHARD. G; DÜRR. C; MACHET. JM; RECOUS. S Y ROGER-ESTRADE. J. (2001). A review of tillage effects on crop residue management, seedbed conditions and seedling establishment. *Soil Till. Res.* 61: 13-32.

HANKS, R. J. and G. L. ASHCROFT. (1980). *Applied soil physics: Soil water and temperature applications.* Springer- Verlag. Berlín. 159 p.

HINCAPIÉ, GÓMEZ. E. (2011). *Estudio y modelación del movimiento del agua en suelos volcánicos de ladera.* Universidad Nacional de Colombia .Facultad de Ciencias Agropecuarias. Escuela de Posgrados. Palmira, Colombia.

IGAC- CVC. (2004). *Levantamiento de suelos y zonificación de tierras del Departamento del Valle del Cauca.* Bogotá D.C. Colombia. 775 p.

IGAC; IDEAM; MAVDT. (2010). *Protocolo para la Identificación y Evaluación de los Procesos de Degradación de Suelos y Tierras por Salinización.* Bogotá D.C. 323 pp.

INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI. (IGAC). (1990). *Propiedades Físicas de los Suelos.* Bogotá. 813 pág.

IPAZ CUASTUMAL SANDRO NOLAN. (2011). *Diagnóstico y caracterización del Sellamiento y encostramiento en molisoles bajo sistemas de producción tradicional y agricultura agroecológica en el Valle del Cauca.* Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Palmira.

ISAAKS E H, SRIVASTAVA R M. (1989). *An introduction to applied geostatistics.* Oxford, Oxford University Press

JAFARIA, M. MOHAMMAD ASGARIB, H. TAHMOURESC, M BINIAZD, M. (2008). *Assessment of Soil Property Spatial Variation Based on the Geostatistical Simulation.* Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

JARAMILLO, D. F. 1997. Variabilidad espacial de suelos. En: Diagnóstico químico de la fertilidad del suelo. Walter Osorio, ed. Medellín. 167 – 188p.

JARAMILLO, D. F. (2002). Introducción a la Ciencia del Suelo. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias .Medellín.

JARAMILLO. D.F (2012). Variabilidad Espacial del Suelo: Bases para su Estudio. Revista de la Facultad de Ciencias Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. V 1 N°1 julio 2012.

JOURNEL, A. G. and HUIJBREGTS, C. J. (1978). Mining geostatistics. Academic Press, New York. 598p.

KAURICHEV, I. S. (1984). Prácticas de edafología. 1ª. Ed. en español. Ed. Mir. Moscú. 280 p.

KEREN, R. (1991). Specific effect of magnesium on soil erosion and water infiltration. Soil Sci. Soc Am. J. 55:783- 787.

KIRKEGAARD, JA; ANGUS. JF; GARDNER. PA Y MULLER. W. (1994). Reduced growth and yield of wheat with conservation cropping. Field studies in the first year of the cropping phase. Austr. J. Agric. Res. 45: 511-528.

KODESOVA, R., JIRKU, V., KODES, V., MUHLHANSELOVA, M., NIKODEM, A., ZIGOVA, A. (2011). Soil structure and soil hydraulic properties of Haplic Luvisol used as arable land and grassland. Soil & Tillage Research 111, 154-161.

LAL, R. (1991). Soil structure and sustainability. J. Sustainable Agric., 1: 67-92.

LAPEN, D.R.; TOPP, G.C.; GREGORICH, E.G. Y CURNOE, W.E. (2004). Rango de agua menos limitativo como indicador de la calidad del suelo y producción de maíz, Eastern Ontario, Canadá. Soil Hill. Res., 78: 151-170.

LATTANZI, A; MARELLI, H; SIGNORILE, O; ARAGÓN, J; DISTEFANO, S. (2004). La siembra directa: presente y futuro. Información recopilada para INTA.

LIPIEC, J., HAJNOS, M., ŚWIEBODA, R., (2012). Estimating effects of compaction on pore size distribution of soil aggregates by mercury porosimeter. *Geoderma* 179–180, 20–27.

LIPIEC, J., KUS, J., SLOWINSKA-JURKIEWICZ, A., NOSALEWICZ, A., (2006). Soil porosity and water infiltration as influenced by tillage methods. *Soil Tillage Res.* 89, 210–220.

LOBO. D Y PULIDO. M. (2010). Métodos e índices para evaluar la estabilidad estructural de los suelos. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Agronomía, Instituto de Edafología.

MACHIWAL, D., JHA, M. AND. MAL. B.C (2006). Modelling infiltration and quantifying spatial soil variability in a Wasteland of Kharagpur, India. *Biosystems Engineering* 95:569-582.

MAESTRE B.; ANDREU F. (2009). Variabilidad espacial de las propiedades físicas de Dos suelos cultivados con palma aceitera en el estado Monagas, Venezuela.

MANUAL ARCGIS FOR DESKTOP (2015). New York.

MARTINEZ. C. (2003). Estadística y Muestreo. Ecoe ediciones. Bogotá. Colombia.

MARTÍNEZ, J.; CEBALLOS. A. (2001). Estimación de Propiedades Hídricas de los Suelos Mediante el uso de Funciones de Edafo-Transferencia. Universidad de Navarra, España.

MARTINO, D. L. (2003). Manejo de restricciones físicas del suelo en sistemas de siembra directa, Grupo de Riego, Agroclima, Ambiente y Agricultura Satelital (GRAS) del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria de Uruguay, Montevideo.

MBAGWU, J. (2004). Aggregate stability and soil degradation in the tropics.

MC VAY, KA; BUDDE. JA; FABRIZZI. K; MIKHA. MM; RICE. CW; SCHLEGEL. AJ; PETERSON.D; SWEENEY.DW Y THOMPSON. C. (2006). Management effects on soil physical properties in long-term tillage studies in Kansas. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 434-438.

MENDEZ A.H., TAMAYO V. A., GOMEZ E. A., BARRERA B. L., MUÑOZ A.R., y GARCÍA R.A. (1999). Manejo de Suelos en Minifundio de Ladera de la Región Andina Mediante Cultivos Permanentes y Transitorios en Rotación Establecidos en Franjas de Nivel. CORPOICA. Bucaramanga. 35p.

MENDOZA. O.H. Y GARCÍA. A. (1989). Efectos del magnesio intercambiable sobre algunas propiedades físicas de varios suelos del valle del cauca. *Acta Agron.* vol. 39(3 - 4) 76 - 81

MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL – (MADR). (2006). Plan Frutícola Nacional: Diagnóstico y Análisis de los Recursos para la Fruticultura en Colombia. Cali. Colombia. Fondo Nacional de Fomento Hortofrutícola - FNFH; Asociación Hortofrutícola de Colombia - ASOHOFRUCOL; Sociedad de Agricultores y Ganaderos del Valle del Cauca - SAG.

MURILLO D et al. (2012). Comparación de métodos de interpolación para la generación de mapas de ruido en entornos urbanos. 63p.

MUNKHOLM, L.J., HECK, R.J., DEEN, B., (2012). Soil pore characteristics assessed from X-ray micro-CT derived images and correlations to soil friability. *Geoderma* 181–182, 22–29.

NACIONES UNIDAS NUEVA YORK. (2000). Manual de sistemas de información Geográfica y cartografía digital.

ORDÓÑEZ, N.; E. LÓPEZ y P. BOTERO. (1992). Cambios en las Propiedades de los Suelos, Relacionados con la Colonización del Bosque Natural, en un Área del Guaviare. *Colombia Amazónica* 6 (1): 37-64.

ORJUELA-MATTAH.M; RUBIANO SANABRIA, Y; CAMACHO-TAMAYO, J.H. (2012). spatial analysis of infiltration in an oxisol of the Eastern plains of Colombia. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Agronomía, Sede Bogotá. Colombia.

OVALLES, F. A. (1992). Metodología para determinar la superficie representada por muestras tomadas con fines de fertilidad FONAIAP. Maracay, Venezuela. 44p.

PAGLIAI, M.; VIGNOZZI. N.; PELLEGRINI. S. (2004). Soil Structure and the effect of management practices. Soil and Tillage Research, 79: 131-143.

PARRA, BJ; BECKER, AR Y CANTÚ, MP. (2011). Condición física de suelos en diferentes sistemas de manejo agrícola del centro sur de Córdoba. Ciencia del Suelo 29(2): 241-251.

PORTA J.; LÓPEZ-ACEVEDO M.; ROQUERO. C. (1999). Edafología para la agricultura y el medio ambiente. 2ª edición. Barcelona, España. Ediciones Mundo-Prensa. 849p.

QUIRK, J. P. (1994). Interparticle forces: A basis for the interpretation of soil physical behaviour. Adv. Agron. 53: 121-182.

RAHMAN, W.A.; ROWELL, D. L. (1979). The influence of magnesium in saline and sodic soils: a specific effect or a problem of cation exchange J. Soil Sci. 30:535-546.

REYNOLDS, WD; BOWMAN, BT; DRURY, CF; TANA, CS Y LU, X. (2002). Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. Geoderma 110: 131-146.

REZA, S.K. SARKARI, D. DARUAH, U AND DAS, T. (2010). Evaluation and Comparison of Ordinary Kriging and Inverse Distance Weighting Methods for Prediction of Spatial Variability of Some Chemical Parameters of Dhalai District, Tripura. National Bureau of Soil Survey and Land Use Planning, Nagpur, India.

RICHARD, G., COUSIN, I., SILLON, J. F BRUAND, A. and GUERIF, J. (2001). Effect of compaction on the porosity of a silty soil: Influence on unsaturated hydraulic properties, Eur. J. Soil Sci., 52: 49-58.

RITSEMA, C.; T. M. STEENHUIS; J. Y. PARLANGE and L. W. DEKKER. (1996). Predicted and observed finger diameters in field soils. *Geoderma* 70: 185-196.

ROWELL, D.L.; SHAINBERG, I. (1979). The influence of magnesium and easily weathered minerals on hydraulic conductivity changes in a sodic soil. *J. Soil Sci.* 30:719-726.

RUBIO GUTIÉRREZ, A.M (2010). La densidad aparente en suelos forestales del parque natural los alcornocales. Universidad de Sevilla. Sevilla .España.

SAIYOURI, N., TESSIER, D., HICHER, P.Y., (2004). Experimental study of swelling in unsaturated compacted clays. *Clay Miner.* 39, 469–479.

SAMPER, F. Y CARRERA, J. (1990). Geo estadística. Aplicaciones a la hidrogeología subterránea. Technical report, Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona.

SANCHEZ. HA; GARCIA JR; CAERES MR Y CORBELLA. RD (1998). Labranzas en la Region Chacopanipeana Subhumeda de Tueuman. 245-256.

SÁNCHEZ, M., GENS, A., OLIVELLA, S., (2012). Analysis of a large-scale heating test incorporating material fabric changes. *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.* 36, 391–421.

SANDOVAL, J. (2007). Principios de Riego y Drenaje. Editorial Universitaria, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.

SCHARGEL, R. Y DELGADO, F. (1990). Características y manejo de los suelos utilizados en la producción de carne en Venezuela. En Plasse, D., Peña de Borsotti, N., eds. VI Cursillo sobre Bovinos de Carne. FCV-UCV, Maracay. pp. 187-220.

SEDIGHI. M, Y THOMAS. H. (2014). Micro porosity evolution in compacted swelling clays A chemical approach. Geoenvironmental Research Centre, Cardiff School of Engineering, Cardiff University.

SHAINBERG, I., AND LETEY, J. (1984) .Response of soil to sodic and saline conditions. *Hilgardia* 52 (2): 57.

SHAINBERG, I.; ALPEROVITCH, N.; KEREN, R. (1988). Effect of magnesium on the hydraulic conductivity of a Nasmectite- sand mixture. *Clays Clay Miner.* 36:432-438.

SOANE. B.D AND VAN OVWERKER. (1994) C.Soil compaction problems in soil agriculture. In:B.D. Soane aand C. Van Ovwerkerk (Editors). *Soil Compaction in Crop Production*. Elsevier, Amsterdam, pp.1-22.

SOCIEDAD COLOMBIANA DE LA CIENCIA DEL SUELO. (1990). *Fundamentos para la interpretación de análisis de suelos, plantas y aguas para riego*. Bogotá. Colombia.

SOIL SURVEY DIVISION STAFF (SSDS). (1993). *Soil survey manual. Handbook No.18*. USDA. Washington D. C. 437 p.

SOIL SURVEY STAFF (SSS). (1998). *Keys to soil taxonomy*. 8ª. Ed. USDA. Washington D. C. 326 p.

SOIL SURVEY STAFF. (SSS) (1999). *Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys*. 2a. Ed. *Agriculture Handbook N° 436*. USDA. Washington D. C. 869 p.

SASAL, MC; ANDRIULO. AE Y TABOADA. MA. (2006). Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in Argentinean Pampas. *Soil Till. Res.* 87: 9-18.

STEPHENS, D. B. (1996). *Vadose zone hydrology*. Lewis Publishers. Florida. U.S.A. 347 p.

STRONG, D.T., DE WEVER, H., MERCKX, R., RECOUS, S., (2004). Spatial location of carbón decomposition in the soil pore system. *Eur. J. Soil Sci.* 55, 739–750.

TABOADA, M.; MICUCCI, F. (2002). Fertilidad física de los suelos, Editorial Facultad Agronomía, Universidad de Buenos Aires, Argentina.

TABOADA, MA. (2008). Influencia de la textura y la estructura de los suelos sobre la fertilidad física. Fertilidad Física de los suelos. Buenos Aires, Argentina. Editorial Facultad de Agronomía. pp 15.

TERRA SANTOS, NERILSON. (2008). Estadística espacial Aplicada. Universidad Federal de Vicosa.

TOPP, GC; REYNOLDS WD; COOK FJ; KIRBY JM Y CARTER MR. (1997). Physical attributes of soil quality. In: EG. Gregorich & MR.Carter (eds.). Soil quality for crop production and ecosystem health. Developments in Soil Science, Elsevier, NY, 25: 21-58.

TRANGMAR, B. B., YOST, R. S. AND UEHARA, G. (1985). Application of geostatistic to spatial studies of soil properties. Advances in Agronomy. 38: 45-94.

TORRENTE TRUJILLO. A. (2003). Características físicas e hidrodinámicas en suelos con alta saturación de magnesio en el valle del río cauca – Colombia. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Palmira.

TORRENTE T., GARCÍA, A. ESCOBAR CH., AMÉZQUITA. E. SAMPAYO N. (2003) .Condiciones hidrofísicas de suelos con alta saturación de magnesio en el Valle del Cauca, Colombia, acta agronómica VOL. 52 (1-4) PÁG. 29-37

UPCHURCH, D. R. Y EDMONDS, W. J. (1992). Statistical procedures for specific objectives. In: Spatial variabilities of soils and landforms. SSSA Special publication No. 28. 2a ed. SSSA Madison. pp: 49 -71.

URRUTIA, NORBERTO. (2011). Impacto Ola Invernal 2010-2011. Distrito de riego RUT. Evento internacional AGUA 2011: Ecosistemas y sociedad. Cali, Colombia. 32 p.

VALENZUELA, I Y TORRENTE, A. (2013). Física de Suelos. Ciencias del suelo. Principios básicos. Segunda edición. Sociedad colombiana de la ciencia del suelo. Bogotá, Colombia. Pág. 156.

VALENZUELA, I Y TORRENTE, A. (2013). Física de Suelos. Ciencias del suelo. Principios básicos. Segunda edición. Sociedad colombiana de la ciencia del suelo. Bogotá, Colombia. Pág. 160.

VALENZUELA, I Y TORRENTE, A. (2013). Física de Suelos. Ciencias del suelo. Principios básicos. Segunda edición. Sociedad colombiana de la ciencia del suelo. Bogotá, Colombia. Pág. 171.

VALENZUELA, I Y TORRENTE, A. (2013). Física de Suelos. Ciencias del suelo. Principios básicos. Segunda edición. Sociedad colombiana de la ciencia del suelo. Bogotá, Colombia. Pág. 149.

VÁSQUES R. et al. (2010). Variabilidad espacial de propiedades físicas y químicas en suelos de la granja experimental de la universidad del Magdalena (Santa Marta, Colombia).

VILLAR, M.V., MARTÍN, P.L., BÁRCENA, I., GARCÍA-SIÑERIZ, J.L., GÓMEZ, R., LLORET, A., (2012). Long-term experimental evidences of saturation of compacted bentonite under repository conditions. Eng. Geol. 149–150, 57–69.

VILLATORO M et al. (2008). Comparación de los interpoladores IDW y Kriging en la Variación espacial de PH, CA, CICE Y P del suelo. 96-97p.

VOORHEES, W.D. (1987). Assessment of soil susceptibility to compaction using soil and climatic data bases. Soil Tillage Res. 10:29-38.

WILSON, M; QUINTERO C; BOSCHETTI N; BENAVIDEZ R Y MANCUSO W. (2000). Evaluación de atributos del suelo para su utilización como indicadores de calidad y sostenibilidad en Entre Ríos. Revista Facultad de Agronomía UBA. 20(1): 23-30.