

**ESTIMACIÓN DE LA CAPACIDAD DE CAMPO EN LA CUENCA SUPERIOR
DEL RÍO LEBRIJA**

**ADRIANA TERESA SIERRA ESPARZA
ANDRES ALEXANDER VELANDIA UBATE**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2016

**ESTIMACIÓN DE LA CAPACIDAD DE CAMPO EN LA CUENCA SUPERIOR
DEL RÍO LEBRIJA**

**ADRIANA TERESA SIERRA ESPARZA
ANDRES ALEXANDER VELANDIA UBATE**

Trabajo de grado en la modalidad de investigación para optar el título de
Ingeniero Civil

DIRECTOR

SULLY GOMEZ ISIDRO

Ingeniero civil, PhD.-Profesor UIS

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2016

DEDICATORIA

Agradezco a mi papa Luis a mi mama Esther por apoyarme en todo lo que necesitaba, por brindarme ese amor incondicional.

A mi hermano Alexander por estar junto a mí y apoyarme muchas gracias.

A mi familia por darme siempre consejos.

Gracias a Andres Velandia el amor de mi vida por acompañarme en este objetivo , por ayudarme , ser mi guía y por estar siempre en los momentos felices y triste, esta es una nueva etapa en mi vida espero compartirla a tu lado con muchos sueños y amor te amo.

A mis amigos por siempre estar a mi lado, apoyarme, especialmente a Aleja, gracias por todo el tiempo junto a ti.

ADRIANA

DEDICATORIA

Agradezco a mi mama Liliana Ubate y mi papa William Garzón por permitirme cumplir esta meta a través su entrega y cuidado.

A mis hermanos por acompañarme y apoyarme.

Al amor de mi vida Adriana Sierra con la que he compartido todo el camino y que me apoyado de manera incondicional en cada paso que di.

A la doctora Sully Gomez que nos brindó su guía y apoyo para el desarrollo de este proyecto.

ANDRES

TABLA DE CONTENIDO

	pag
INTRODUCCIÓN	15
1. UBICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA SUPERIOR DEL RÍO LEBRIJA	16
1.1 LOCALIZACIÓN	16
1.2 CLIMA	17
1.3 TEXTURA DEL SUELO	17
2. MATERIALES Y MÉTODOS	18
2.1 MÉTODOS PARA LA ESTIMACIÓN DE LA CAPACIDAD DE CAMPO	18
2.1.1 Modelo Oliveira	23
2.1.2 Método de Brooks-Corey	25
2.2 METODOLOGÍA UTILIZADA PARA REALIZAR EL MAPA DE TIPO DE SUELO.....	27
2.2.1 Teledetección.....	28
2.2.2 Espectro electromagnético.....	28
2.2.3 Firma espectral	29
2.2.4 Imágenes satelitales	30
2.2.5 Clasificación del suelo a partir de imágenes satelitales	32
2.2.6 Estimación del error	33
2.3 OBTENCIÓN DEL MAPA DE PROFUNDIDAD DE SUELO	34
3. ANALISIS DE RESULTADOS	36
3.1 MAPA DE CAPACIDAD DE CAMPO OLIVEIRA	36
3.2 MAPA DE CAPACIDAD DE CAMPO DEL MÉTODO DE BROOKS - COREY	39
3.3 MAPA DE TIPO DE SUELOS.....	41

4. CONCLUSIONES	44
CITAS BIBLIOGRÁFICAS.....	45
BIBLIOGRÁFICAS	47
ANEXOS	49

LISTA DE TABLAS

	pag
Tabla 1. Pisos térmicos de la CSRL.....	17
Tabla 2. Cuadro resumen de la información disponible.....	20
Tabla 3. Datos estadísticos clasificación textural 58 muestras.....	21
Tabla 4. FPT presentes en la literatura para distintos suelos.....	23
Tabla 5. Parámetros estadísticos.....	25
Tabla 6. Fuente de datos modelo Brooks-Corey.....	26
Tabla 7. Parámetros de los suelos Rawls et al (1982).....	26
Tabla 8. Características del satélite Landsat 8 OLI/TIRS.....	31
Tabla 9. Resultados de la capacidad de campo por el método Oliveira et al 2002.....	37
Tabla 10. Resultados de la capacidad de campo por el método de Brooks- Corey.....	39
Tabla 11. Características típicas de humedad para cada tipo de suelo.....	41
Tabla 12. Matriz de confusión clasificación de tipo de suelo.....	42
Tabla 13. Áreas que abarcan los diversos tipos de suelo de la CSRL.....	43

LISTA DE FIGURAS

	pag
Figura 1. Localización de la CSRL.....	16
Figura 2. Cuadro explicativo.....	19
Figura 3. Clasificación textural de las 58 muestras presentes en la cuenca superior del río Lebrija.....	21
Figura 4. Formas de agua en el suelo.....	21
Figura 5. Relación valores estimados vs datos de campo para 10, 33, 1500 KPa modelo de Grupta & Larson (1979).....	24
Figura 6. Relación estimaciones vs datos de campo para 33, 1500 KPa modelo de Oliveira et al. (2002).....	24
Figura 7. Diagrama textural de la USDA.....	27
Figura 8. Espectro electromagnético.....	29
Figura 9. Firma espectral.....	30
Figura 10. Firma espectral del suelo.....	31
Figura 11. Imagen Landsat 8 región de estudio.....	32
Figura 12. Etapa de entrenamiento.....	33
Figura 13. Mapa de profundidad del suelo de la CSRL.....	34
Figura 14. Mapa de capacidad de campo por el método de Oliveira.....	38
Figura 15. Mapa de capacidad de campo por el método de Brooks-Corey.....	40
Figura 16. Mapa de tipo de suelo de la CSRL.....	41

LISTA DE ANEXOS

	pag
Anexo A, Ensayos utilizados sobre la CSRL	50
Anexo B, Mapa de tipo de suelo de la CSRL.....	51
Anexo C, Mapa de profundidad del suelo de la CSRL	52
Anexo D, Mapa de capacidad de campo por el método de Oliveira de la CSRL.....	53
Anexo E, Mapa de capacidad de campo por el método de Brooks-Corey de la CSRL.....	54

RESUMEN

TÍTULO: ESTIMACIÓN DE LA CAPACIDAD DE CAMPO EN LA SUPERIOR DEL RÍO LEBRIJA

AUTORES: ADRIANA TERESA SIERRA ESPARZA;
ANDRES ALEXANDER VELANDIA UBATE*

PALABRAS CLAVE: CAPACIDAD DE CAMPO, TELEDETECCIÓN, FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA EDAFOLÓGICA, OLIVEIRA ET AL 2002, BROOKS-COREY.

DESCRIPCIÓN:

En el presente trabajo se propone una metodología para estimar la capacidad de campo de la cuenca superior del río Lebrija, utilizando como datos base 58 muestras tomadas por: Ingeominas, el instituto geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y la corporación para la defensa de la meseta de Bucaramanga (C.M.D.B) y una imagen del satélite Landsat 8 OLI/TIR compuesta de las bandas 5, 6, 7 que corresponde al infrarrojo cercano e infrarrojo medio respectivamente pues es en esta porción del espectro electromagnético que se evidencia el comportamiento típico de los suelos. La estimación de la capacidad de campo se llevó a cabo mediante dos relaciones empíricas, el método Oliveira y el método de Brooks-Corey, las cuales se basan en la textura del suelo. Se desarrollaron dos mapas: uno profundidad del suelo y otro de tipo de suelo los cuales son fundamentales para la realización de los mapas de capacidad de campo para cada método. El mapa de tipo de suelo se realizó mediante la herramienta clasificación supervisada de imágenes satelitales en el programa ArcGis en su extensión Spatial Analyst, el mapa de profundidad se realizó mediante la herramienta interpolación tipo Kriging ordinario en el software ArcGis. En la cuenca se observó la presencia de cinco clases texturales franco arenoso, franco arcillo arenoso, areno arcilloso y arcilloso se observó principalmente la presencia de dos clases texturales franco arenosa y arcillosa ocupando el 26,62 % y el 37,76 % respectivamente del área total de la cuenca. El método de Oliveira tuvo el mejor comportamiento frente a los rangos propuestos por la Organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura (FAO) para la capacidad de campo.

*Trabajo de grado

**Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Sully Gomez Isidro.

ABSTRACT

TITLE: ESTIMATION OF FIELD CAPACITY IN THE UPPER WATERSHED OF LEBRIJA RIVER

AUTHOR: ADRIANA TERESA SIERRA ESPARZA;
ANDRES ALEXANDER VELANDIA UBATE*

KEYWORDS: FIELD CAPACITY, REMOTE SENSING, PEDOLOGICAL TRANSFER FUNCTION, OLIVEIRA ET AL 2002, BROOKS-COREY.

DESCRIPTION:

The present work proposes a methodology for estimating field capacity of the upper watershed of the Lebrija river, using database 58 samples taken by: Ingeominas, el instituto geográfico Agustín Codazzi (IGAC) and y la corporación para la defensa de la meseta de Bucaramanga (CMDDB) and a satellite image Landsat 8 OLI / TIR it consists of the bands 5, 6, 7 corresponding to the near infrared and mid-infrared respectively it is in this portion of the electromagnetic spectrum than the typical behavior of soils is evident. Estimating field capacity was carried out by two empirical relationships, Oliveira method and the method of Brooks-Corey, which are based on soil texture. Two maps were developed. One soil depth and other soil type which are fundamental to the realization of field capacity maps for each method. The map of soil type was performed by supervised classification of satellite imagery tool in the program ArcGIS Spatial Analyst extension, the depth map was made by type ordinary Kriging interpolation tool in ArcGIS software. The classification presents five textural classes sandy loam, sandy clay loam, sandy clay and clay, predominantly clayey which occupies 37.74% of the total area classified of the watershed. The method Oliveira had the best performance against the ranges proposed by the Organization of the United Nations for Food and Agriculture (FAO) to field capacity.

*Bachelor Thesis

**Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Sully Gomez Isidro.

INTRODUCCIÓN

Con el tiempo las variables hidrológicas van tomando mayor importancia debido a los avances tecnológicos y el creciente aumento en la población, lo cual conlleva a la necesidad del transporte, almacenamiento y distribución del recurso hídrico para satisfacer las necesidades tanto de la industria como de los individuos pertenecientes a una comunidad.

La función de absorber, retener y suministrar agua es una de las misiones ecológicas fundamentales que desempeña el suelo; la cantidad de agua en el suelo que es capaz de almacenar para ser usada por la vegetación, limita su existencia y productividad, aun en mayor medida que la cantidad de nutrientes disponibles [1], en consecuencia el agua en el suelo es un factor ecológico e ingenieril de gran importancia.

La capacidad de campo es un parámetro del suelo que se utiliza ampliamente en la ingeniería de suelos y aguas, para la generación de modelos hidrológicos de flujo. La definición original de capacidad de campo por Veihmeyer y Hendrickson (1949) se modificó ligeramente en el Glosario de Ciencia del Suelo (SSSA 1984) como: "capacidad de campo es la cantidad de agua que queda en el suelo dos o tres días después de haber sido mojada y después de que el drenaje libre es insignificante".

La capacidad de campo es importante para la estimación del almacenamiento estático, disponibilidad de agua, intensidad de riego y principalmente para el modelamiento hidrológico.

En este proyecto se propone una metodología para la elaboración de dos mapas de capacidad de campo de la cuenca superior del río Lebrija a partir de relaciones empíricas y uso de herramientas de teledetección.

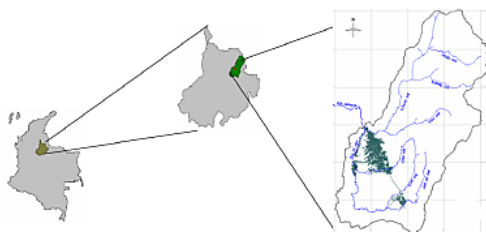
1. UBICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA SUPERIOR DEL RÍO LEBRIJA

La cuenca superior del río Lebrija (CSRL) tiene su parte más alta en el altiplano de Berlín y Paramo de Santurban sobre el flanco occidental de la cordillera oriental, alcanza alturas entre 643 y 4210 msnm. Está conformada por el Río de Oro y Río Surata los cuales tienen unión en el punto denominado café Madrid, considerado el punto de cierre de esta cuenca. La CSRL es de vital importancia debido a que abastece a uno de los principales centros urbanos del oriente Colombiano como lo es el área metropolitana de Bucaramanga [2].

1.1 LOCALIZACIÓN

La CSRL se encuentra ubicada en el nororiente del departamento de Santander en la provincia de Soto entre las coordenadas de Greenwich $6^{\circ}52' 13,604''$ y $7^{\circ}29'37,808''$ latitud norte y $73^{\circ}16' 30,03''$ y $72^{\circ} 46' 14,825$ de latitud oeste [2].

Figura 1. Localización de la CSRL.



Fuente: A. M, S. Gómez, 2007.

Esta cuenca está constituida por los municipios de Bucaramanga, Girón, Floridablanca y Piedecuesta y otros municipios menores como Suratá, Tona, California, Vetas, Matanza y Charta. La cuenca está conformada por cuatro subcuentas las cuales son: Río Surata con un área de 473 km², Río Tona con un área de 207 km², Río de Oro con 468 km² y Río Frío con 132 km² para un área total de 1340 km² [2].

La delimitación de la cuenca fue obtenida mediante la rasterización de una base cartográfica en escala 1:25000.

1.2 CLIMA

El clima de la cuenca está definido por la orografía y los aspectos físicos de la cuenca como la vegetación, suelos y rocas. La zona se clasifica mediante pisos térmicos, lo cual incide sobre la vegetación. En la Tabla 1 se muestran los pisos térmicos.

Tabla 1 Pisos térmicos de la CSRL

Pisos Térmicos	Área (Ha)
Piso Basal Tropical	21120
Piso Premontano	94697
Piso Montano Bajo	44961
Piso Montano	22448
Piso Subalpino	2177

Fuente: A. M, S. Gómez, 2007.

1.3 TEXTURA DEL SUELO

La textura del suelo se refiere a las cantidades relativas de partículas de diverso tamaño que contiene el suelo [3].

Los suelos de la CSRL según su textura se clasifican en tres grandes grupos: grueso, franco y fino que a su vez se dividen en otros grupos; las texturas que se encontraron en los ensayos realizados por parte del IGAC, Ingeominas y la CMDB fueron: franco arenoso, arcilla, franco arcilloso arenoso y areno arcilloso. Los datos de texturas y su respectivo análisis se presentan a continuación.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

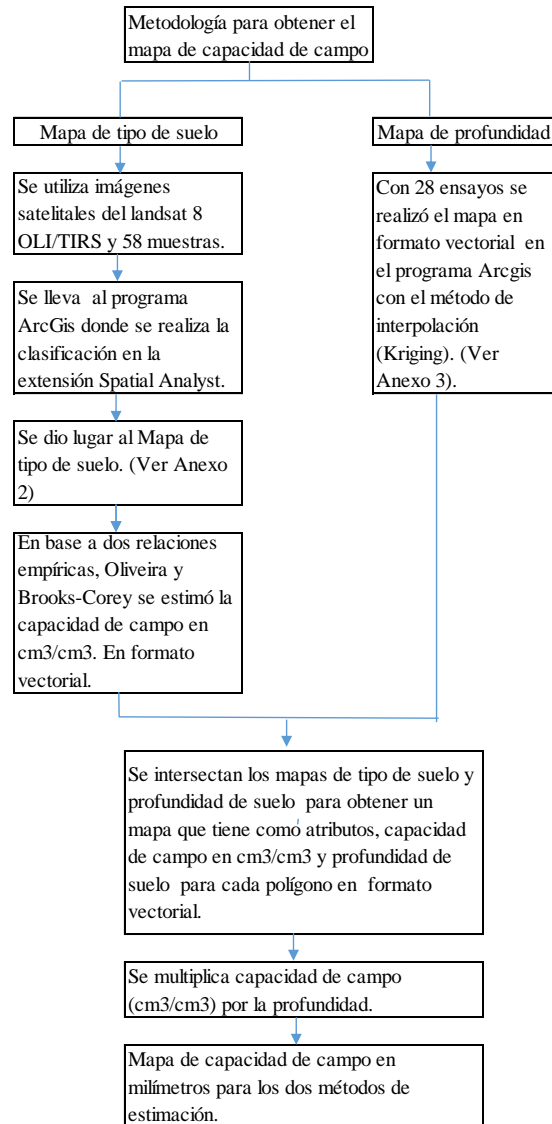
A continuación se presenta la metodología y conceptos que permitieron obtener la capacidad de campo y mapas de capacidad de campo.

2.1 MÉTODOS PARA LA ESTIMACIÓN DE LA CAPACIDAD DE CAMPO

La capacidad de campo, se define como el contenido de agua en el suelo después de 48 horas de un riego o lluvia abundante. Esta medida representa la máxima cantidad de agua que puede retener el suelo cuando la mayoría de los macro poros se encuentran ocupados por aire [4].

La capacidad de campo se halló utilizando dos métodos empíricos que se basan en la textura. Posteriormente se halló el mapa de tipo de suelo (distribución espacial de suelos) y el mapa de profundidad de los suelos. En los numerales 3.2 y 3.1 se presentan las metodologías para desarrollar el mapa de tipo de suelos y el de profundidad respectivamente. En la Figura 2 se muestra el cuadro explicativo de la metodología.

Figura 2. Cuadro explicativo.



Para hallar el mapa de capacidad de campo en lámina de agua se lleva el mapa de tipo de suelos de formato raster a formato vectorial, con el fin de poder hacer operaciones entre mapas, luego la información del mapa de tipo de suelos se exporta a Excel donde se halla la capacidad de campo en cm^3/cm^3 .

El mapa de profundidad de suelo se intersecta con el mapa de tipo de suelo, esta nueva tabla de atributos se exporta a Excel con el fin de multiplicar la información de capacidad de campo con su respectiva profundidad para dar lugar a los mapas de capacidad de campo en lámina de agua.

Para obtener los resultados de este proyecto se usaron los datos de 58 muestras de suelos tomadas en la CSRL y sus alrededores, 29 de ellas realizadas por Ingeominas en su estudio: Proyecto de investigación geológica e hidrogeológica en la región central de la región de Santander (2007) , 17 realizadas por el (IGAC) en su estudio general de suelos y zonificación de tierras de Santander y 12 realizadas por la (C.M.D.B) en el documento de diagnóstico amenazas de inundación y erosión en el río de oro (2005). La información disponible incluye profundidades de suelos, porcentajes de arena, limo y arcilla (tabla 2).

Tabla 2. Cuadro resumen de la información disponible (Ver anexo 1).

Entidad	Número de datos	Información	Subcuencas	n
IGAC	17	Textura	Río de Oro	8
			Río Frio	1
		Profundidad	Río Tona	4
			Río Surata	4
CDMB	12	Textura	Río de Oro	9
		Profundidad	Río Frio	3
Ingeominas	29	Textura	Río Frio	9
			Río Tona	9
			Río de Oro	11

Nota n es el número de datos por cada subcuenca

Para la mayoría de las muestras se dispone de datos de la distribución de tamaño de partículas (arcilla, fracciones de limo y arena), pero no se tienen datos en cuanto a materia orgánica o densidad aparente. En la Figura 3 se puede observar que los suelos analizados de la CSRL, muestran la presencia esencialmente de cuatro clases texturales: franco arenosa, arenosa arcillosa, franco arenosa arcillosa y arcillosa, dentro de las cuales se presenta una mayor concentración de la textura arcillosa como se observa en la Tabla 3 donde 34 ensayos pertenecen a esta clase textural.

Figura 3. Clasificación textural de las 58 muestras presentes en la cuenca superior del río Lebrija.

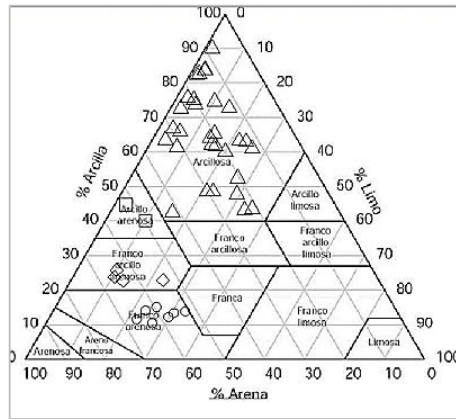
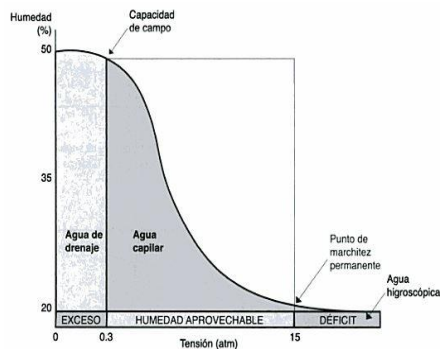


Tabla 3. Datos estadísticos clasificación textural 58 muestras.

	número de ensayos	% arcilla	% limo	% arena
Franco arenoso	6	15,33%	28,00%	56,67%
Franco arcillo arenoso	6	22,00%	20,00%	58,00%
Arcilloso	34	63,16%	17,51%	19,31%
Areno Arcilloso	12	42,50%	7,50%	50,00%

Con base en esta información y con la ayuda de metodologías encontradas en la literatura se hallaron los valores de capacidad de campo. El concepto de las formas de agua en el suelo se puede observar en la Figura 4.

Figura 4. Formas de agua en el suelo



Fuente: V. Juan, 1998.

En la práctica, se considera que la capacidad de campo se obtiene cuando el suelo se encuentra a un potencial matricial (ψ) o presión de succión de 33 KPa [4].

Debido a la gran variabilidad espacial de las características de retención y transmisión de agua del suelo, sus observaciones carecen en general de un aceptable nivel de confianza [5]. Además, en algunos casos existen discrepancias importantes entre las mediciones en laboratorio y las observaciones en campo [6]. Por estas razones, se crearon las funciones de transferencia edafológica (FPT). Cabe señalar que las FPT se establecen generalmente por regresión lineal y corresponden con modelos empíricos que describen la relación entre ciertos parámetros básicos de suelos y sus propiedades.

Se reconoce que una FPT no es adecuada para todos los tipos del suelo. Así que la necesidad de encontrar fórmulas adaptadas al contexto edafológico local es real.

La estimación de la capacidad de campo para cada clase textural se determinó con la ayuda de dos relaciones empíricas: el modelo de Oliveira basado en regresiones lineales que está en función de la textura y el modelo de Brooks-Corey que tiene como fundamento la curva de retención de agua y la conductividad hidráulica del suelo, parámetros que son medidos de manera experimental pero se han propuesto una serie de modelos empíricos para determinar las dos funciones hidráulicas dentro de los cuales los modelos de Brooks and Corey (BC) y el modelo de van Genuchten (VG) son los más usados.

Estos modelos tienen en común que la variable independiente es la textura, es decir porcentaje de: arena, limo y arcilla, lo cual permite una fácil, rápida y económica estimación.

Tabla 4. FPT presentes en la literatura para distintos suelos.

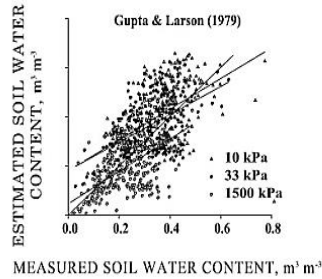
fuentes literaria	suelos	modelo
Oliviera et al (2002)	Brazil	$\theta \text{ (kg/kg)} = 0,00333 * \text{Limo} + 0,0387 * \text{arcilla}$
Arruda et al. (1986)	Brazil	$\theta \text{ (g/100g)} = 3,074 + 0,629 * (\text{limo} + \text{arcilla}) - 0,003438 * (\text{limo} + \text{arcilla})^2$
Masutti (1997)	Brazil	$\theta \text{ (g/100g)} = -1,569 + 0,429 * (\text{limo} + \text{arcilla})$
Rawls et al (1982)	EE.UU	$\theta \text{ (m}^3\text{/m}^3\text{)} = 0,258 - 0,002 * \text{arena} + 0,0036 * \text{arcilla} + 0,0299 * \text{MO}$
Saxton et al (1986)	EE.UU	$\theta \text{ (m}^3\text{/m}^3\text{)} = (\psi \text{ pm/A})^{1/B}$
Grupta & Larson (1979)	EE.UU	$\theta \text{ (m}^3\text{/m}^3\text{)} = 0,00308 * \text{arena} + 0,00804 * \text{limo} + 0,00221 * \text{MO} - 1,43 * \text{da}$
Edwin R. Perlata, Eder Barrios (2006)	colombia	$\theta \text{ (m}^3\text{/m}^3\text{)} = 15,691 * \text{arcilla} + 0,092 * \text{limo} + 1,787 * \text{M.O} - 103,172 * \text{Dap}$

Como se ve en la Tabla 4 hay una serie de modelos para hallar la capacidad de campo que se basan principalmente en la textura del suelo, la selección de los modelos a aplicar se hizo teniendo en cuenta, la información presente y la exactitud en relación con los valores de campo.

2.1.1 Modelo Oliveira Una función de transferencia edafológica o FPT (por sus siglas en inglés) es una relación empírica que permite relacionar variables de fácil medición como la textura, densidad aparente, materia orgánica, presentes en el suelo, con variables de interés como la conductividad hidráulica y la capacidad de campo; puesto que su determinación en campo resulta lenta y costosa [7].

En la literatura se encuentran diversas FPT, en su mayoría desarrolladas en suelos de clima templado. Estas FPT no presentan buenos resultados en suelos tropicales como se ve en la Figura 5 pues sobreestiman la capacidad de campo y se obtiene gran dispersión en relación con los valores reales.

Figura 5. Relación valores estimados vs datos de campo para 10, 33, 1500 KPa modelo de Grupta & Larson (1979).

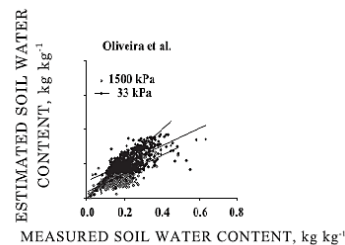


Fuente: Reichert, J., Albuquerque, J., Kaiser, D., Reinert, D., Urach, F., Carlesso, R, 2009.

Esto puede ser debido a las diferencias mineralógicas entre los suelos tropicales y las regiones de clima templado [7]; por lo cual se hace necesario usar FPT que hayan sido desarrolladas en base a observaciones realizadas en condiciones climáticas similares a las de los suelos de la zona de estudio.

El modelo de Oliveira como se ve en la figura 6 ofrece una estimación precisa, tiene un menor grado de dispersión con respecto a modelos desarrollados en suelos de clima templado y una mayor correlación con los valores reales.

Figura 6. Relación estimaciones vs datos de campo para 33, 1500 KPa modelo de Oliveira et al. (2002).



Fuente: Reichert, J., Albuquerque, J., Kaiser, D., Reinert, D., Urach, F., Carlesso, R 2009.

El modelo de Oliveira tiene un comportamiento sobresaliente frente a otras FPT, presenta un MSE (error medio cuadrático) cercano a cero (Tabla 5), medida que expresa el alcance de la diferencia entre las estimaciones derivadas de la muestra y el valor poblacional verdadero; un MSE cercano a cero determina el estimador más apropiado para la variable de estudio [8], lo que le da al modelo una alta exactitud al momento de realizar la estimación de la capacidad de campo, debido a lo anterior este será el método aplicado para este estudio.

Tabla 5. Parámetros estadísticos

modelo	n	R ²	MSE
Oliviera et al (2002)	684	0,46	0,0019
Masutti (1997)	684	0,46	0,0024
Rawls et al (1982)	293	0,34	0,0085
Gupta & Larson (1979)	293	0,26	0,0109

Fuente: Adaptado de Reichert, J., Albuquerque, J., Kaiser, D., Reinert, D., Urach, F., Carlesso, R, 2009.

2.1.2 Método de Brooks-Corey Este método tiene como únicas variables independientes la textura y el potencial matricial; a capacidad de campo el potencial matricial tiene un valor de -1/3 de bar o -33 kPa. Para este modelo la capacidad de campo se puede estimar a partir la curva de retención de agua la cual se puede ver en la Figura 4.

La ecuación que determina la capacidad de campo para el modelo de Brooks-Corey es:

$$\theta_{fc} = \left| \frac{\Psi_{fc}}{\Psi_{ae}} \right|^{-\frac{1}{b}} * (\theta_s - \theta_r) + \theta_s \quad (1)$$

Donde θ_{fc} es la capacidad de campo volumétrica, Ψ_{fc} potencial matricial a capacidad de campo en cm, Ψ_{ae} potencial de entrada de aire, θ_s contenido de agua saturada, θ_r contenido de agua residual y b un parámetro adimensional [9].

Los parámetros varían con las propiedades del suelo tales como la densidad aparente, textura, por lo tanto la determinación de los parámetros debería hacerse con base en mediciones en campo, sin embargo, este proceso requiere de tiempo y es costoso.

Para determinar dichos parámetros existe la oportunidad de apoyarse en bases de datos de la comunidad internacional como por ejemplo la base de datos de propiedades hidráulicas del suelo no saturado (UNSODA, Leji 1996).

Los parámetros para el desarrollo del modelo proveniente de cuatro fuentes (Tabla 6).

Tabla 6. Fuente de datos modelo Brooks-Corey.

n	fuelle
1845 perfiles	Digman (1994)
2541 perfiles	Software Hydrus -1D basados en Rawls et al. (1982)
4510 perfiles	Software Hydrus -1D basados en Carsel y Parrish (1998).
1578 perfiles	Twarkavi et al. (2009)

La estimación de la capacidad de campo se basó en la información del software Hidrus-1D basados en Rawls et al. (1982), cuyos parámetros se muestran en la tabla 7.

Tabla 7. Parámetros de los suelos Rawls et al (1982).

Tipo de suelo	θ_r (cm ³ /cm ³)	θ_s (cm ³ /cm ³)	Ks (cm/d)	ψ_{ae} (cm)	b	c
Arena	0,02	0,417	504	7,25	1,69	6,38
Arena arcillosa	0,035	0,401	146,6	8,7	2,11	7,22
Franco areno arcillosa	0,041	0,412	62,2	14,66	3,11	9,21
Franca	0,027	0,434	31,7	11,15	4,55	12,09
Limo	0,015	0,486	16,3	20,75	4,74	12,48
Franco limoso	0,015	0,486	16,3	20,75	4,74	12,48
Franco arcillo arenoso	0,068	0,33	10,3	28,09	4	11
Franco arcilloso	0,075	0,39	5,5	25,91	5,25	13,31
Franco arcillo limoso	0,04	0,432	3,6	32,57	6,62	16,25
Arcilla arenosa	0,109	0,321	2,9	29,15	5,95	14,9
Arcilla limosa	0,056	0,423	2,2	34,25	7,87	18,75
Arcilla	0,09	0,385	1,4	37,31	7,63	18,27

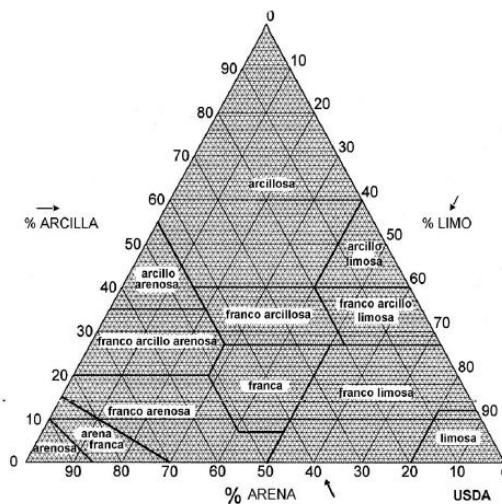
Fuente: Zhen-tao Cong*, Hua-fang LÜ, Guang-heng NI, 2014.

2.2 METODOLOGÍA UTILIZADA PARA REALIZAR EL MAPA DE TIPO DE SUELO.

Para este proyecto se define suelo como la capa de material que se encuentra entre la superficie y el estrato impermeable o roca. El suelo presenta diferentes características dependiendo de su localización geográfica o a medida que cambia la profundidad. La clasificación del suelo suele apoyarse en la composición del suelo y su morfología. Para este estudio se realizará la clasificación de suelos propuesta por la USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos) la cual agrupa los suelos en clases texturales como se ve en la Figura 7 basándose principalmente en los porcentajes de arcilla, limo y arena. Para el desarrollo del mapa de tipo de suelo se aplicó la clasificación supervisada. Para este fin se ubicaron una serie de muestras las cuales se asume que representan de manera apropiada cada una de las clases texturales presentes en la CSRL.

La clasificación se desarrolló en el programa ArcGis 10.1 a través de la extensión Spatial Analyst en el clasificador de máximo ajuste.

Figura 7. Diagrama textural de la USDA



Fuente: E. Bergslien 2012.

2.2.1 Teledetección El concepto de teledetección tiene importancia en este proyecto para contextualizar y entender la información contenida en las imágenes satelitales que fueron usadas para realizar la clasificación de tipo de suelo mediante el programa de análisis ArcGis.

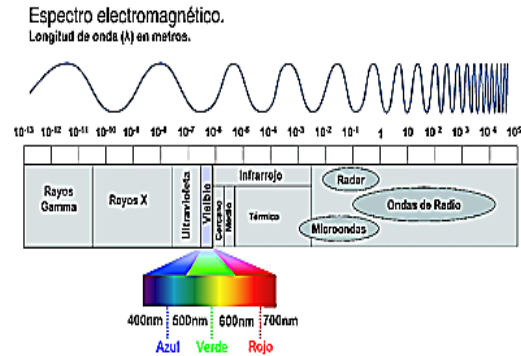
Es la ciencia de obtener información acerca de la superficie de la tierra sin entrar en contacto con ella, esto se realiza detectando y grabando la energía emitida, procesando, analizando y aplicando la información [10]. Desde el punto de vista de su aplicación la teledetección tiene como objetivo la identificación de características sobre la superficie terrestre, basándose en que los materiales de la superficie terrestre tienen una respuesta espectral propia. Por lo tanto puede ser utilizada para hallar información de tipos y propiedades de suelos. Estas respuestas se pueden-resumir en los siguientes tipos:

- Radiación solar reflejada por los objetos (luz visible e infrarrojo reflejado)
- Radiación terrestre emitida por los objetos (infrarrojo térmico)
- Radiación terrestre emitida por el sensor y reflejada por los objetos (radar) [11].

Las técnicas basadas en los dos primeros tipos se conocen como teledetección pasiva, es decir, los sensores pasivos de teledetección reciben la señal de una fuente de luz o energía externa reflejada por la superficie de los cuerpos. Al contrario, la teledetección activa se basan en que los sensores emiten su propia fuente de energía que va directo hacia los cuerpos y reciben la señal de retorno (radares, sonares, láser) [11].

2.2.2 Espectro electromagnético. Es la distribución energética del conjunto de las ondas electromagnéticas, en tanto a lo que se refiere a un objeto se define como la radiación electromagnética que emite o absorbe una sustancia. El espectro se extiende desde la radiación de menor longitud de onda, hasta las ondas electromagnéticas de mayor longitud como son las de radio.

Figura 8. Espectro electromagnético



Fuente: <http://fisica.laguia2000.com> [citado 16 de Diciembre del 2015].

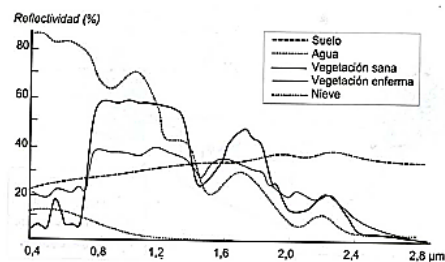
La teledetección se enfoca de manera particular en los espectros electromagnéticos producto de la interacción de los rayos electromagnéticos generados durante el intercambio energético entre la tierra y el sol [11].

2.2.3 Firma espectral Los diferentes tipos de superficie que hay sobre la tierra como lo es el agua, el suelo y la vegetación, reflejan la radiación de diferente manera, la radiación reflejada en función de la longitud de onda se llama firma espectral, mediante diversos experimentos de laboratorio se ha logrado caracterizar el comportamiento de las diferentes superficies al recibir la radiación y caracterizar los porcentajes de reflexión, absorción y transmisión.

Las propiedades espectrales del suelo son relativamente simples, la transmisión es nula, por tanto toda la energía se absorbe o refleja. La reflectividad es relativamente baja para todas las bandas aunque aumentando hacia el infrarrojo. Hay una cierta dependencia entre reflectividad y contenido en agua del suelo, cuanto mayor es el segundo, mayor es la primera. Este aumento se ve interrumpido en aquellas regiones en las que el agua absorbe energía, por tanto cuanto mayor sea el contenido de agua en el suelo, mayor va a ser la disminución en reflectividad de estas regiones.

Otros factores que afectan la respuesta espectral del suelo son la textura con una mayor reflectividad al aumentar el tamaño medio de las partículas de suelo, los suelos arenosos tienen mayor reflectividad (se ven más claros) que los arcillosos. El problema es que la textura afecta también al contenido de humedad por lo que no resulta fácil diferenciar (con imágenes de satélite) entre ambos factores [12].

Figura 9. Firma espectral



Fuente: <http://sigte-tallerjornadas2015.readthedocs.org> [citado 16 de Diciembre del 2015].

2.2.4 Imágenes satelitales Las imágenes satelitales se obtuvieron en el sitio web de la United States Geological Survey (USGS), es una agencia científica del gobierno federal de los Estados Unidos; las imágenes provienen del equipo Landsat 8 OLI/TIRS (Operational Land Imager/Thermal Infrared Sensor), cuyas bandas utilizadas fueron 5, 6 y 7. La primera banda pertenece al infrarrojo cercano y las dos últimas al infrarrojo medio. La banda 5 hace énfasis en el contenido de agua de biomasa y costas; la banda 6 se utiliza para discriminar el contenido de humedad del suelo, la vegetación y penetra las nubes finas y la banda 7 se emplea para lo mismo que la banda 6 pero con mucha más precisión.

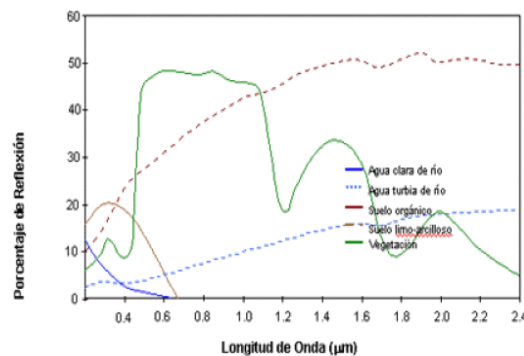
En la Tabla 7 se muestran las características del Landsat 8 OLI/TIRS.

Tabla 8. Características del satélite Landsat 8 OLI/TIRS.

Satélite	Sensor	Banda	Longitud de onda	Resolución
Landsat 8	OLI/TIRS	5	0,85 - 0,88	30
		6	1,57 - 1,65	30
		7	2,11 - 2,29	30

Para la clasificación de los tipos de suelo se utilizaron las bandas de infrarrojo cercano e infrarrojo medio de la imagen landsat, ya que en ellas se evidencia el comportamiento espectral típico del suelo limo-arcilloso [11].

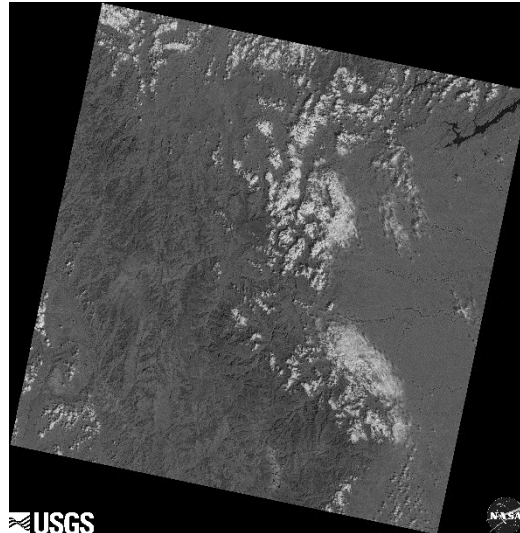
Figura 10. Firma espectral del suelo



Fuente: <http://www.unalmed.edu.co> [citado 16 de diciembre del 2015].

Las imágenes satelitales escogidas fueron las que corresponden a la fecha 10 de junio del 2014 debido a que la fecha coincide con un día de época seca y hay pocas nubes.

Figura 11. Imagen Landsat 8 región de estudio.



Fuente: <http://www.usgs.gov/>. co [citado 1 de diciembre del 2015].

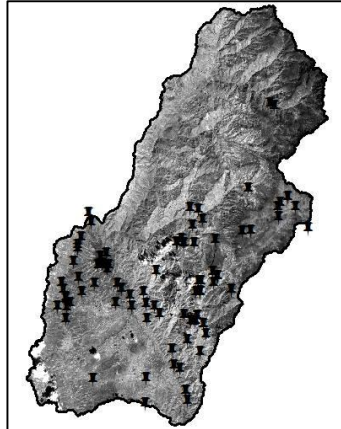
2.2.5 Clasificación del suelo a partir de imágenes satelitales La definición de tipo de suelo utilizando sensores remotos se basa en la reflectancia diferencial de los suelos en bandas espectrales registradas por un sensor en distintas longitudes de onda. Dicho concepto implica que cada clase de suelo tiene un comportamiento espectral único frente a otros y tal comportamiento es más o menos evidente según la porción del espectro electromagnético donde se registre. [11]

Para el desarrollo del mapa de clase textural se aplicó la clasificación supervisada. Para este fin se ubicaron los 58 datos disponibles los cuales se asume que representan de manera apropiada cada una de las clases texturales presentes en la CSRL de acuerdo a la localización que se observa en la Figura 11.

La clasificación se desarrolló en el programa Arcgis 10.1 a través de la extensión Spatial Analyst en el clasificador de máximo ajuste en cuatro etapas: entrenamiento, clasificación, post clasificación y mapeo. En la etapa de

entrenamiento se toman muestras en forma de pixel y se le asigna una clase basada en el conocimiento previo de la zona de estudio.

Figura 12. Etapa de entrenamiento



Posteriormente para realizar la clasificación se usó el clasificador estadístico máximo ajuste o máxima verosimilitud. Este clasificador considera un conjunto de campos de entrenamiento con los cuales define el diagrama de las clases y la respectiva distribución de probabilidad considerando cada clase como una distribución normal de probabilidad, en el caso de que se superpongan dos curvas de probabilidad indicando que un pixel tiene igual probabilidad de pertenecer a dos clases, el programa Arcgis establece como criterio un umbral de aceptación el cual indica el porcentaje de pixeles de la distribución de probabilidad de una clase serán clasificados como pertenecientes a ella.

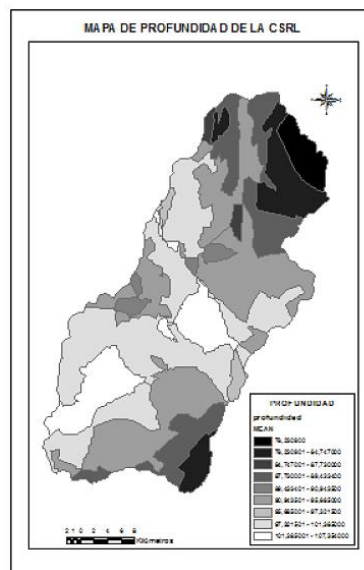
2.2.6 Estimación del error Existen dos posibilidades, evaluar una estimación teórica del error en función de las características del algoritmo de clasificación o analizar una serie de áreas test obtenidas del mismo modo que las áreas de entrenamiento. El segundo modo de proceder permite obtener una estimación más realista de los errores mientras la muestra de pixeles para la estimación del error sea lo suficientemente grande y representativo [13].

Un método simple y apropiado de evaluaciones de los errores es utilizar la matriz de confusión de clases con este tipo de análisis, se obtiene, no sólo una caracterización del error cometido, sino también una medida sobre la adecuación de las clases consideradas a la realidad y de los parámetros utilizados para caracterizarlas. Puede por tanto utilizarse para definir un nuevo conjunto de clases para realizar una clasificación.

2.3 OBTENCIÓN DEL MAPA DE PROFUNDIDAD DE SUELO

Para realizar el mapa de profundidad de suelo se utilizó la información de 28 ensayos con su respectiva profundidad, y esta se interpoló utilizando un método geoestadístico denominado Kriging el cual es una herramienta de la extensión de Arcgis Spatial Analyst y realiza la distribución espacial.

Figura 13. Mapa de profundidad del suelo de la CSRL (Ver anexo 3).



Los métodos de interpolación que constan de métodos geo estadísticos, como Kriging, se basan en modelos estadísticos que incluyen la auto correlación es decir la relación estadística entre los puntos medidos. Gracias a esto, la técnica

de estadística geográfica no solo tiene la capacidad de producir una superficie de predicción, sino que también proporcionan alguna medida de certeza o precisión de las predicciones [14].

Kriging presupone que la distancia o la dirección entre los puntos de muestra reflejan una correlación espacial que puede utilizarse para explicar la variación en la superficie. La herramienta Kriging ajusta una función matemática a una cantidad especificada de puntos o a todos los puntos dentro de un radio específico para determinar el valor de salida para cada ubicación. Kriging es un proceso que tiene varios pasos, entre los que se incluyen, el análisis estadístico exploratorio de los datos, el modelado de variogramas, la creación de la superficie y (opcionalmente) la exploración de la superficie de varianza. Este método es más adecuado cuando se sabe que hay una influencia direccional o de la distancia correlacionada espacialmente en los datos. Se utiliza a menudo en la ciencia del suelo y la geología [15].

3. ANALISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se describen los resultados obtenidos a partir de las metodologías descritas para la obtención de un mapa de tipo de suelo y dos mapas de capacidad de campo de la cuenca superior del río Lebrija.

Debido a que los productos finales consisten en modelos, se presentó además, los análisis respectivos a cada uno de ellos, con el fin de validar la fidelidad con la que estos modelos se ajustan a la realidad.

Los dos métodos presentaron comportamientos distintos esto es debido principalmente a que el modelo de Oliveira se basa en las características físicas presentes en el suelo como la textura, mientras que el modelo de Brooks-Corey tiene como fundamento una serie de parámetros que se encuentran en bases de datos desarrolladas en suelos de climas templados, lo que induce error en las estimaciones.

3.1 MAPA DE CAPACIDAD DE CAMPO OLIVEIRA

Empleando el método de Oliveira, se estimó el mapa de capacidad de campo en lámina de agua, producto de la intersección del mapa de tipo de suelo con el mapa de profundidad de suelo. De esta forma el primer paso fue estimar la capacidad de campo para cada clase textural en unidades cm^3/cm^3 y al multiplicar por la respectiva profundidad promedio se obtuvo esta en lámina de agua unidades de mm. En la Tabla 8 se muestran los resultados obtenidos para cada tipo de suelo.

Confrontando los resultados del método de Oliveira en la Tabla 8 con respecto a los datos de la FAO cuyos valores se encuentran en la Tabla 10, se observa que dos tipos de suelos están dentro de los rangos como son los suelos areno arcilloso y franco arenoso, la textura arcillosa se encuentra prácticamente dentro del rango y el franco arcillo arenoso está cerca del límite inferior.

Tabla 9. Resultados de la capacidad de campo por el método Oliveira et al 2002.

Tipo de suelo	Oliveira et al. (cm ³ /cm ³)
Urbano	0
Franco arenoso	0,22
Arcilla	0,42
Franco arcillo arenoso	0,25
Areno arcilloso	0,15

En la Figura 13 se observa el mapa de capacidad de campo con diferentes rangos sobre la cuenca donde el menor valor es cero y pertenece a la zona urbana debido a que los suelos son impermeables. El máximo valor es de 451,53 mm el cual pertenece al suelo arcilloso con una profundidad de suelo promedio de 107 cm.

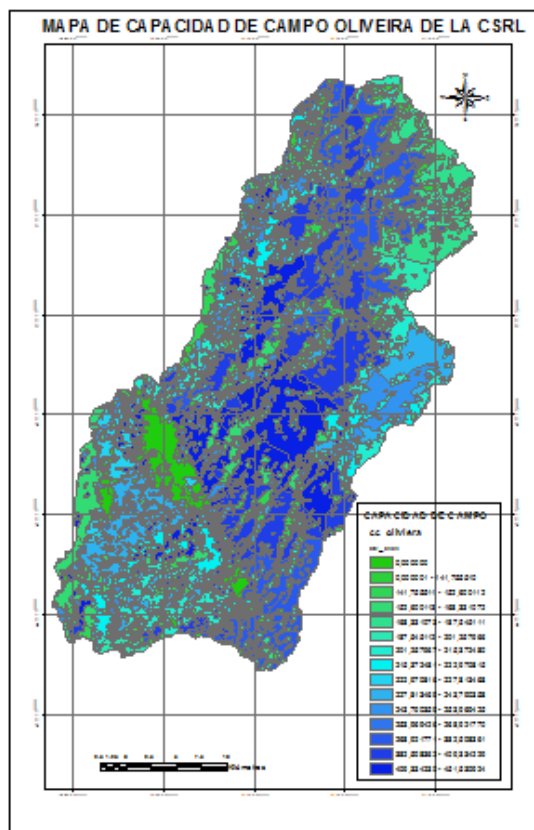
En la subcuenca del río Suratá se observa que se generan tres zonas de importancia. En la parte Este en la cercanía del municipio de Vetas se perciben valores de capacidad de campo entre 152 hasta 168 mm donde el suelo predominante es de textura franco arenosa y se evidencian profundidades entre 72 a 82 cm ; en la zona central en la periferia con los municipios de Surata y California los valores varían entre 268 y 409 mm donde sobresale la textura arcillosa con una profundidad promedio de 91,5 cm; en la parte Oeste los valores se encuentran entre los rangos de 0 y 451mm destacando las clases texturales franco arenoso y franco arcillo arenoso con profundidades promedio de 86 cm.

En la subcuenca del río Tona en la zona Este se observa que la capacidad de campo varía entre 215 y 253 mm, predominando el suelo franco arcilloso arenoso con una profundidad promedio de 94 cm. En la parte baja en las cercanías de Tona hay presencia de suelos profundos con valores de 107 cm y la presencia de textura arcillosa lo que conlleva a que en esta zona se presente la máxima capacidad de campo entre valores 409 hasta 451 mm; En la zona central los valores varían entre 215 y 409 mm predominando el suelo arcilloso.

En la subcuenca de río Frío en la parte oeste se encuentra la zona urbana, en la zona este los valores varían entre 141 y 409 mm donde predomina el suelo arcilloso con una profundidad promedio 101 cm.

En la subcuenca del río de Oro en la zona Oeste los valores de capacidad de campo se encuentran en el rango de 222 y 451 mm, predominando el suelo arcilloso. En la parte baja se pueden encontrar todas las clases texturales encontradas en la cuenca, predominando la textura franco arenosa con profundidades promedio de 95 cm , la capacidad de campo varía entre 152 hasta 451 mm. En la zona Oeste y Norte predominan los suelos areno arcilloso, franco arenoso y la zona urbana, la capacidad de campo varía de 152 hasta 451 mm aunque hay pocas partes donde hay máxima capacidad de campo.

Figura 14. Mapa de capacidad de campo por el método de Oliveira (Ver Anexo D).



3.2 MAPA DE CAPACIDAD DE CAMPO DEL MÉTODO DE BROOKS - COREY

Empleando el método de Brooks-Corey, se estimó la capacidad de campo del mismo modo que el método de Oliveira et al (2002) obteniendo los valores en lámina de agua como se observa en la Figura 14 donde el valor máximo de capacidad de campo es de 333 mm. En la Tabla 9 se observan los resultados de capacidad de campo para cada clase textural.

Comparando los resultados arrojados por el método de Brooks-Corey, que se encuentran en la Tabla 9, respecto a los valores de la FAO (Tabla 10), se observa que los valores están por debajo de los rangos establecidos.

Tabla 10. Resultados de la capacidad de campo por el método de Brooks-Corey.

Tipo de suelo	Método de Brooks-Corey (cm ³ /cm ³)
Urbano	0,00
Franco arenoso	0,18
Arcilla	0,31
Franco arcillo arenoso	0,21
Areno arcilloso	0,10

Los dos mapas de capacidad de campo son similares en cuanto a las zonas debido a que estos son productos de la intersección del mapa de tipo de suelo y profundidad del suelo, pero se presentan diferencias en cuanto a la magnitud de la misma.

En la subcuenca del río Surata, en la zona Este la capacidad de campo (cc) se encuentra entre 89 hasta 282 mm, en la zona central aledaño a los municipios de Suratá y California los valores varían entre los rangos 243 y 302 mm; en la zona Oeste los valores varían entre el mínimo que es cero y el máximo que es 333 mm.

En la subcuenca del Río Tona en la zona Oeste la cc varía entre 172 a 211 mm, en las cercanías a Tona se presenta la mayor zona donde hay máxima

capacidad de campo con un valor de 333 mm, en el centro los valores oscilan entre 202 a 333 mm.

En la subcuenca del Río Frío en la zona Oeste la cc es cero debido a que se encuentra la zona urbana, en la zona este los valores oscilan entre 89 hasta 333 mm teniendo predominancia la cc entre 282 a 302 mm.

En la subcuenca del Río de Oro en la zona Oeste los valores de cc varían entre 180 a 333 mm, en la zona baja se encuentran entre 96 a 333 mm, en la zona Norte y oeste esta varia igual que en la zona baja , aunque hay pocas partes donde está la máxima capacidad de campo.

**Figura 15. Mapa de capacidad de campo por el método de Brooks-Corey
(Ver Anexo E).**

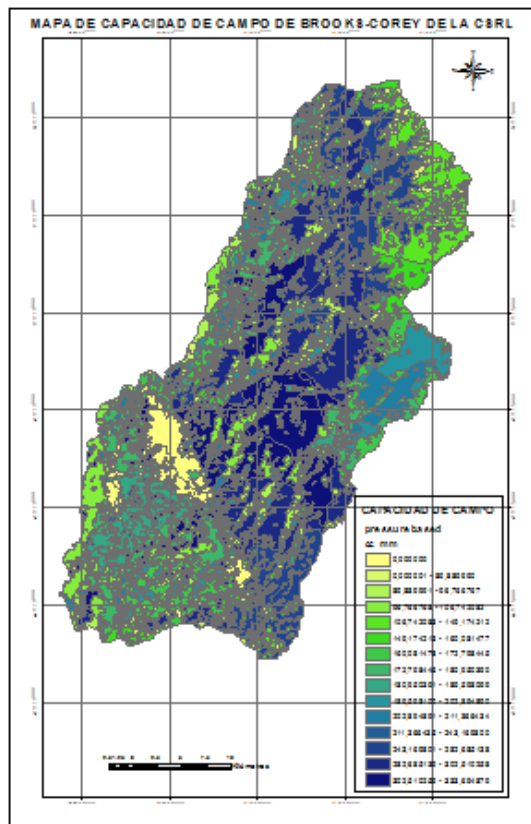


Tabla 11. Características típicas de humedad para cada tipo de suelo.

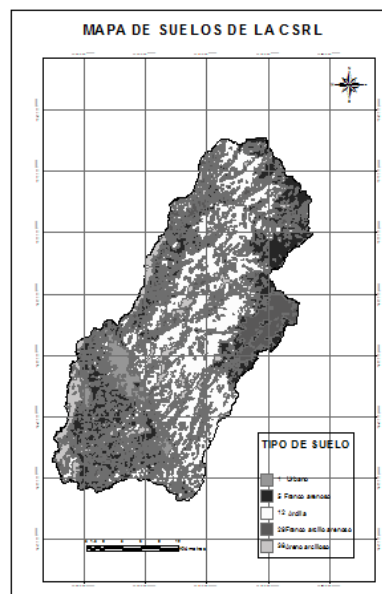
Tipo de suelo (USA Soil Texture Classification)	Características de humedad del suelo	
	ØFC	CAPACIDAD DE CAMPO
	cm³/cm³	
Franco Arenoso	0.18 - 0.28	
Arcilla	0.32 - 0.4	
Franco arcillo arenoso	0.29 - 0.37	
Areno arcilloso	0.11 - 0.19	

Fuente: R. Allen, L. Pereira, D. Raes, M. Smith, 2006, Adaptada por los autores.

3.3 MAPA DE TIPO DE SUELOS.

En base a clasificación supervisada de imágenes satelitales en el software Arcgis en su extensión Spatial Analyst tomando como campos de entrenamiento 58 ensayos y llevando acabo los procedimientos descritos en el numeral 3.2 se dio lugar al mapa de tipo de suelo sobre la CSRL, el cual sirvió como base para la obtención de los mapas de capacidad de campo.

Figura 16. Mapa de tipo de suelo de la CSRL (Ver Anexo B).



En la tabla 11 se muestra la matriz de confusión la cual muestra de forma porcentual el nivel de aceptación para cada una de las clases generadas para realizar la clasificación supervisada usando las muestras tomadas en la etapa de entrenamiento.

Los valores en la diagonal principal muestran el porcentaje de datos que fue clasificado correctamente con respecto a los datos de campo. Por ejemplo para el suelo arcilloso el 61,76% de los datos fue clasificado como arcilloso. Los valores fuera de la diagonal principal por ejemplo en la fila 1 columna 2 indican que el 7,14% de los datos que pertenecían a la clase textural franco arenoso fueron clasificados como zona urbana del mismo modo para los demás datos.

El método de clasificación presento un buen comportamiento frente a las observaciones hechas en campo, teniendo un rendimiento promedio de 64,35% lo cual significa que en promedio acertó un 64,35% de las veces al comparar la estimación con los datos de campo. Teniendo en cuenta que el desempeño medio del método de clasificación es de 64,35% de acierto en la clasificación, se considera que el clasificador tuvo buen rendimiento (mayor al 60%.)

Tabla 12. Matriz de confusión clasificación de tipo de suelo.

tipo	urbano	franco arenoso	arcilloso	franco arcillo arenoso	areno arcilloso
urbano	100,00%	7,14%	0,00%	0,00%	10,00%
franco arenoso	0,00%	50,00%	11,76%	20,00%	20,00%
arcilloso	0,00%	14,29%	61,76%	20,00%	10,00%
franco arcillo arenoso	0,00%	14,29%	8,82%	60,00%	10,00%
areno arcilloso	0,00%	14,29%	17,65%	0,00%	50,00%

Como resultado de la clasificación supervisada se obtuvo el total de área clasificada para cada grupo como se observa en la tabla 12 , obteniéndose un área total de 1336,3 km² el cual es muy cercano al área dado por Ingeominas el cual es de 1340 km² obteniéndose como porcentaje de error 0,27%.

Tabla 13. Áreas que abarcan los diversos tipos de suelo de la CSRL.

Plano de información:		
CLASIFICACIÓN		
Representación: Plano Vectorial		
Tipo de suelo	Área (Ha)	Área (%)
Urbano	4982	3,73%
Franco arenoso	35573	26,62%
Arcilla	50461	37,76%
Franco arcillo arenoso	20665	15,46%
Areno arcilloso	21953	16,43%
Área total	133634	100,00%

4. CONCLUSIONES

Se obtuvieron dos mapas de capacidad de campo de la cuenca superior del río Lebrija , desarrollados a partir del modelo de Oliveira y el modelo de Brooks-Corey, basados en muestras de campo.se obtuvieron dos mapas, uno de tipo de suelo y otro de profundidad de suelo necesarios para poder obtener los mapas de capacidad de campo. Los valores de capacidad de campo obtenidos varían entre 0 y 451 mm por el método de Oliveira y entre 0 y 333 mm por el método de Brooks-Corey

Se considera que el modelo de Oliveira muestra el comportamiento más apropiado para la estimación de la capacidad de campo debido a que los valores obtenidos en cada clase textural se encuentran dentro de los rangos propuestos por la FAO. Este resultado se debe a las que este modelo incluye propiedades edáficas de suelo tropicales.

En la parte central de la cuenca se encuentra la zona de máxima capacidad de campo con un valor de 451 mm, esto debido a la presencia de la textura arcillosa con una profundidad promedio de suelo de 107 cm.

Se generó un mapa de tipo de suelo de la cuenca superior del río Lebrija en formato vectorial y raster con celdas de 30 x 30 metros, a partir de la combinación de las bandas 5, 6 y 7 del satélite Landsat 8 OLI/TIRS ubicadas en la path/row 7/55. La clasificación se realizó mediante la técnica de clasificación supervisada incluida en el software Arcgis 10.1 en la extensión Spatial Analyst, utilizando como información de entrenamiento resultados de 58 muestras.

La información y los mapas obtenidos en este trabajo pueden ser utilizados como datos de entrada a modelos hidrológicos, también es una información básica para cálculos de evapotranspiración, almacenamiento estático y disponibilidad de agua.

CITAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. M. Domingo, R. Fernández, E. Corral, I. Rapp “Estimación de la capacidad de retención de agua en el suelo: revisión del parámetro CRA” invest agrar: sist recur for ,2006, enero 15, 14-23
- [2] A. M, S. Gómez, Memoria explicativa de la investigación geológica e hidrogeológica en el macizo de Santander, tomo I, Bucaramanga 2007.
- [3] F. Suarez, Conservación de suelos, tercera edición, lica, Costa Rica 1979.
- [4] Mariano D., Puricelli M. estimación y distribución de parámetros del suelo para modelación hidrogeológica [tesis doctoral]. Universidad politécnica de Valencia, 2003
- [5] M. Kutílek, D.R. Nielsen, Soil Hydrology. Catena Verlag, Cremlingen-Destedt. 1994
- [6] L.F. Ratliff, J.T. Ritchie, D.K. Cassel,. Field-measured limits of soil water availability as related to laboratory-measured properties. Soil Sci. Soc. Am. J., 1983 ,pp.770-775.
- [7] Reichert, J., Albuquerque, J., Kaiser, D., Reinert, D., Urach, F., Carlesso, R, “Estimation of water retention and availability in soils of rio grande do sul,” R. Bras. Ci. Solo, vol 33, 2009
- [8] M. Castro, Y. Villacampa, estadística aplicada a la ingeniería civil, Club universitario, España 2000.
- [9] Zhen-tao Cong*, Hua-fang LÜ, Guang-heng NI, “A simplified dynamic method for field capacity estimation and its parameter analysis”, Water Science and Engineering, Vol. 7, No. 4, Oct. 2014.
- [10] Segado F., Principios de Teledeteccion , Universidad de Murcia 1996,pp 9-10.

[11] R. Castellanos, D. Torres, Elaboración de un modelo digital de elevaciones y subdivisión del tipo de suelo de la cuenca del río de oro parte alta [Pregrado].Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2009.

[12] E. Chuvieco, teledetección ambiental, tercera edición, Ariel, Barcelona 2008.

[13] Sobrino J., Teledeteccion , Servicio de Publicaciones, Universidad de Valencia 2000, pp 269-273.

[14] Peña J., Sistema de Informacion Geografica aplicados a la gestión del territorio, tercera edición , Editorial club universitario , España 2008, pp 56-60.

[15] Leiva N., Metodología para el cálculo de la humedad del suelo utilizando parámetros topográficos (MDE), climáticos y edáficos en una sector del piedemonte depositacional del municipio de Villavicencio [Magister], Universidad Nacional de Colombia, Bogotá 2012.

BIBLIOGRÁFICAS

- A. M, S. GÓMEZ, Memoria explicativa de la investigación geológica e hidrogeológica en el macizo de Santander, tomo I, Bucaramanga 2007.
- E. CHUVIECO, teledetección ambiental, tercera edición, Ariel, Barcelona 2008.
- F. SUAREZ, Conservación de suelos, tercera edición, IICA, Costa Rica 1979.
- J. M. DOMINGO, R. FERNÁNDEZ, E. CORRAL, I. RAPP “Estimación de la capacidad de retención de agua en el suelo: revisión del parámetro CRA” Invest Agrar: Sist Recur For ,2006, enero 15, 14-23
- LEIVA N., Metodología para el cálculo de la humedad del suelo utilizando parámetros topográficos (MDE), climáticos y edáficos en un sector del piedemonte depositacional del municipio de Villavicencio [Magister], Universidad Nacional de Colombia, Bogotá 2012.
- L.F. RATLIFF, J.T. RITCHIE, D.K. CASSEL,. Field-measured limits of soil water availability as related to laboratory-measured properties. Soil Sci. Soc. Am. J., 1983 ,pp.770-775.
- M. CASTRO, Y. VILLACAMPA, estadística aplicada a la ingeniería civil, Club universitario, España 2000.
- MARIANO D., PURICELLI M. estimación y distribución de parámetros del suelo para modelación hidrogeológica [tesis doctoral]. Universidad politécnica de Valencia, 2003
- M. KUTÍLEK, D.R. NIELSEN, Soil Hydrology. Catena Verlag, Cremlingen-Destedt. 1994
- PEÑA J., Sistema de Información Geográfica aplicados a la gestión del territorio, tercera edición , Editorial club universitario , España 2008, pp 56-60.
- REICHERT, J., ALBUQUERQUE, J., KAISER, D., REINERT, D., URACH, F., CARLESSO, R, “Estimation of water retention and availability in soils of rio grande do sul,” R. Bras. Ci. Solo, vol 33, 2009

R. CASTELLANOS, D. TORRES, Elaboración de un modelo digital de elevaciones y subdivisión del tipo de suelo de la cuenca del río de oro parte alta [Pregrado].Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2009.

SEGADO F., Principios de Teledeteccion , Universidad de Murcia 1996,pp 9-10.

ZHEN-TAO CONG*, HUA-FANG LÜ, GUANG-HENG NI, “A simplified dynamic method for field capacity estimation and its parameter analysis”, Water Science and Engineering, Vol. 7, No. 4, Oct. 2014.

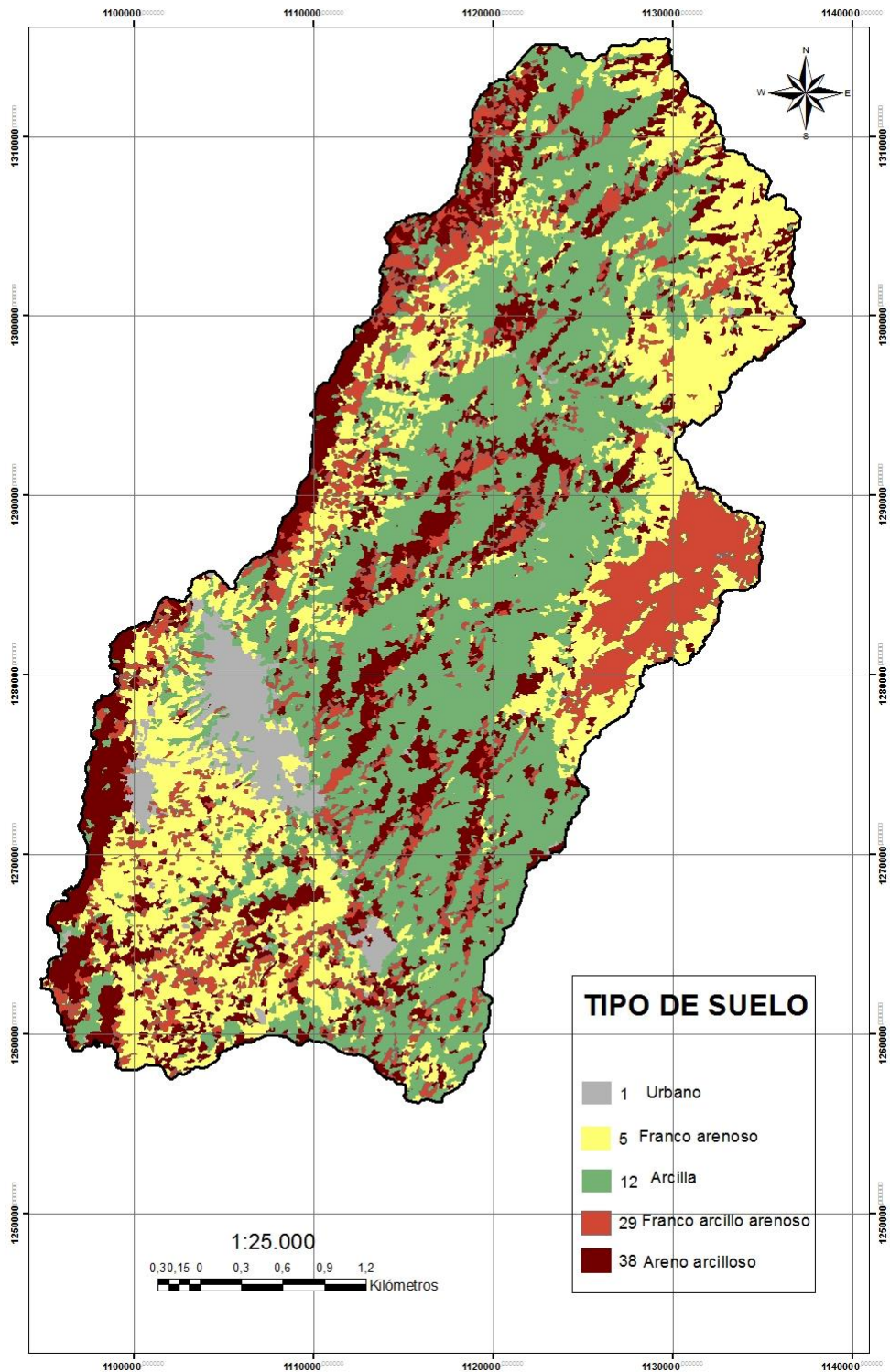
ANEXOS

Anexo A. Ensayos utilizados sobre la CSRL.

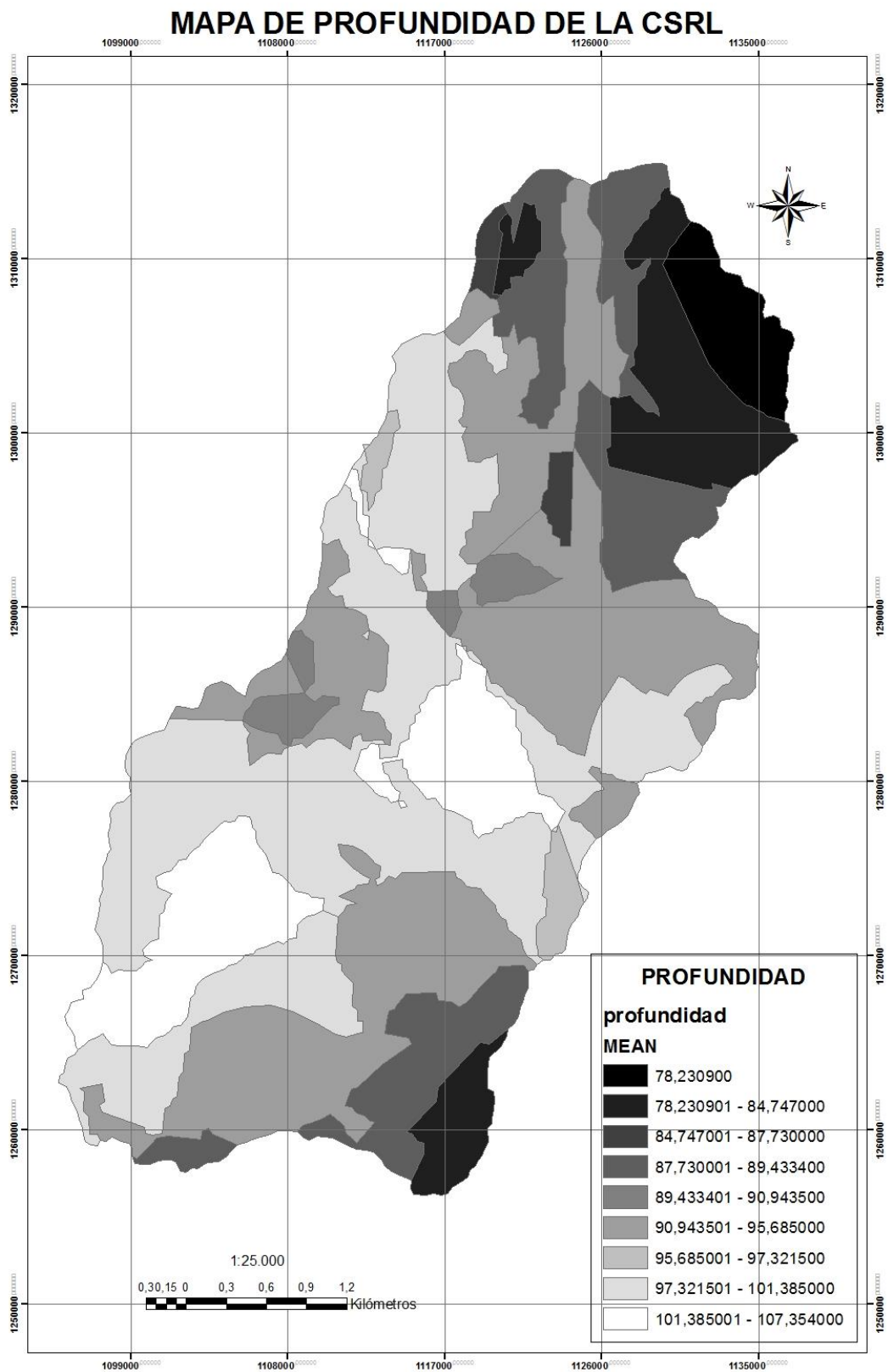
FUENTE	CODIGO	X	Y	TIPO	PROFUNDIDAD (cm)	ARCILLA	LIMO	ARENA
IGAC	PS-203	1129259,677	1301629,376	franco arenoso	120	16,00%	24,00%	60,00%
IGAC	PS-342	1117327,805	1260950,358	franco arcillo arenoso	70	20,00%	18,00%	62,00%
IGAC	PS-345	1115472,931	1266722,486	arcilloso	150	48,00%	22,00%	30,00%
IGAC	PS-235	1132826,584	1286951,377	franco arcillo arenoso	150	20,00%	24,00%	56,00%
IGAC	PS-238	1126544,219	1283555,396	franco arcillo arenoso	120	22,00%	18,00%	60,00%
IGAC	PS-262	1134614,365	1283975,597	franco arenoso	120	16,00%	30,00%	54,00%
IGAC	PS-324	1108302,263	1275371,262	arcilloso	51	44,00%	34,00%	22,00%
IGAC	PS-306	1111651,86	1259186,639	arcilloso	120	50,00%	22,00%	28,00%
IGAC	PS-328	1103676,627	1286115,102	franco arcillo arenoso	130	26,00%	20,00%	54,00%
IGAC	PS-351	1104464,23	1276131,405	franco arenoso	150	14,00%	30,00%	56,00%
IGAC	PS-305	1104184,673	1262550,879	arcilloso	48	42,00%	14,00%	44,00%
IGAC	PS-204	1129874,279	1301231,534	franco arenoso	28			
IGAC	PS-214	1121483,724	1282252,564	franco arenoso	50			
IGAC	PS-319	1117545,957	1259506,777	franco arenoso	22			
IGAC	PS-330	1102548,424	1282579,551	franco arcillo arenoso	110			
IGAC	PS-321	1103924,755	1284825,201	franco arcillo arenoso	100			
IGAC	PS-304	1111705,583	1262781,51	arcilloso	135			
CDMB	A-9	1100392	1271111	areno arcilloso	0,2	40,00%	10,00%	50,00%
CDMB	A-10	1099239	1272822	areno arcilloso	0,7	45,00%	5,00%	50,00%
CDMB	B-2	1102200	1276949	areno arcilloso	0,3			
CDMB	C-22	1100957	1273328	areno arcilloso	0,4			
CDMB	C-15	1102708	1274895	areno arcilloso	0,3			
CDMB	D-32	1101453	1279221	areno arcilloso	0,64			
CDMB	E-31	1102048	1281639	areno arcilloso	0,5			
CDMB	E-33	1101090	1278279	areno arcilloso	0,3			
CDMB	E-26	1100907	1273343	areno arcilloso	0,6			
CDMB	E-24	1099607	1273880	areno arcilloso	0,5			
CDMB	E-23	1100216	1273404	areno arcilloso	0,4			
CDMB	B-6	1099768	1276207	areno arcilloso				
INGEOMINAS	CJF-110-III-c-002	1131795	1288350	arcilloso		60,73%	9,54%	29,73%
INGEOMINAS	CJF-110-III-c-012	1130649	1287533	arcilloso		68,49%	4,11%	27,40%
INGEOMINAS	CJF-110-III-c-018	1125338	1283507	arcilloso		79,65%	4,60%	15,75%
INGEOMINAS	CJF-110-III-c-033	1126127	1289575	arcilloso		89,17%	4,46%	6,37%
INGEOMINAS	CJF-109-IV-d-046	1118279	1284285	arcilloso		75,56%	3,98%	20,46%
INGEOMINAS	CJF-120-II-b-082	1117149	1281805	arcilloso		64,66%	17,92%	17,42%
INGEOMINAS	CJF-120-II-b-087	1119150	1286574	arcilloso		78,38%	7,83%	13,78%
INGEOMINAS	CJF-120-II-b-094	1111424	1274857	arcilloso		53,47%	24,31%	22,22%
INGEOMINAS	CJF-120-II-b-100	1111892	1271063	arcilloso		67,05%	12,52%	20,43%
INGEOMINAS	CJF-120-II-b-105	1113587	1271735	arcilloso		65,01%	17,03%	17,88%
INGEOMINAS	CWO-068	1112968	1272910	arcilloso		49,53%	29,19%	21,36%
INGEOMINAS	CWO-094	1111742	1273252	arcilloso		34,27%	53,84%	11,89%
INGEOMINAS	CWO-096	1116798	1282429	arcilloso		83,15%	4,15%	12,70%
INGEOMINAS	CWO-105	1119088	1276467	arcilloso		66,67%	8,33%	25,00%
INGEOMINAS	CWO-138	1120233	1268932	arcilloso		90,16%	1,64%	8,20%
INGEOMINAS	CWO-139	1116555	1263979	arcilloso		64,92%	22,72%	12,36%
INGEOMINAS	CWO-196	1115682	1264553	arcilloso		75,31%	10,89%	13,20%
INGEOMINAS	CWO-218	1130416	1285529	arcilloso		23,75%	72,84%	3,40%
INGEOMINAS	CWO-220	1121270	1276222	arcilloso		81,45%	3,01%	15,45%
INGEOMINAS	CWO-258	1118807	1274901	arcilloso		66,64%	3,29%	30,07%
INGEOMINAS	LMT120IIB074	1113113	1277831	arcilloso		64,42%	21,47%	14,11%
INGEOMINAS	LMT120IIB082	1118755	1270797	arcilloso		61,09%	17,10%	21,81%
INGEOMINAS	LMT120IIB084	1118512	1270725	arcilloso		84,94%	3,54%	11,52%
INGEOMINAS	LMT120IIB181	1118039	1270848	arcilloso		49,90%	22,46%	27,64%
INGEOMINAS	LMT120IIB187	1117075	1271713	arcilloso		45,06%	34,55%	20,39%
INGEOMINAS	LMT121IA244	1121138	1277766	arcilloso		48,48%	21,21%	30,30%
INGEOMINAS	LMT109IVD278	1119668	1285099	arcilloso		76,05%	6,71%	17,24%
INGEOMINAS	LMT109IVD292	1117879	1286809	arcilloso		71,35%	15,06%	13,59%
INGEOMINAS	LMT109IVD313	1118486	1281811	arcilloso		60,84%	27,58%	11,58%

Anexo B. Mapa de tipo de suelo de la CSRL.

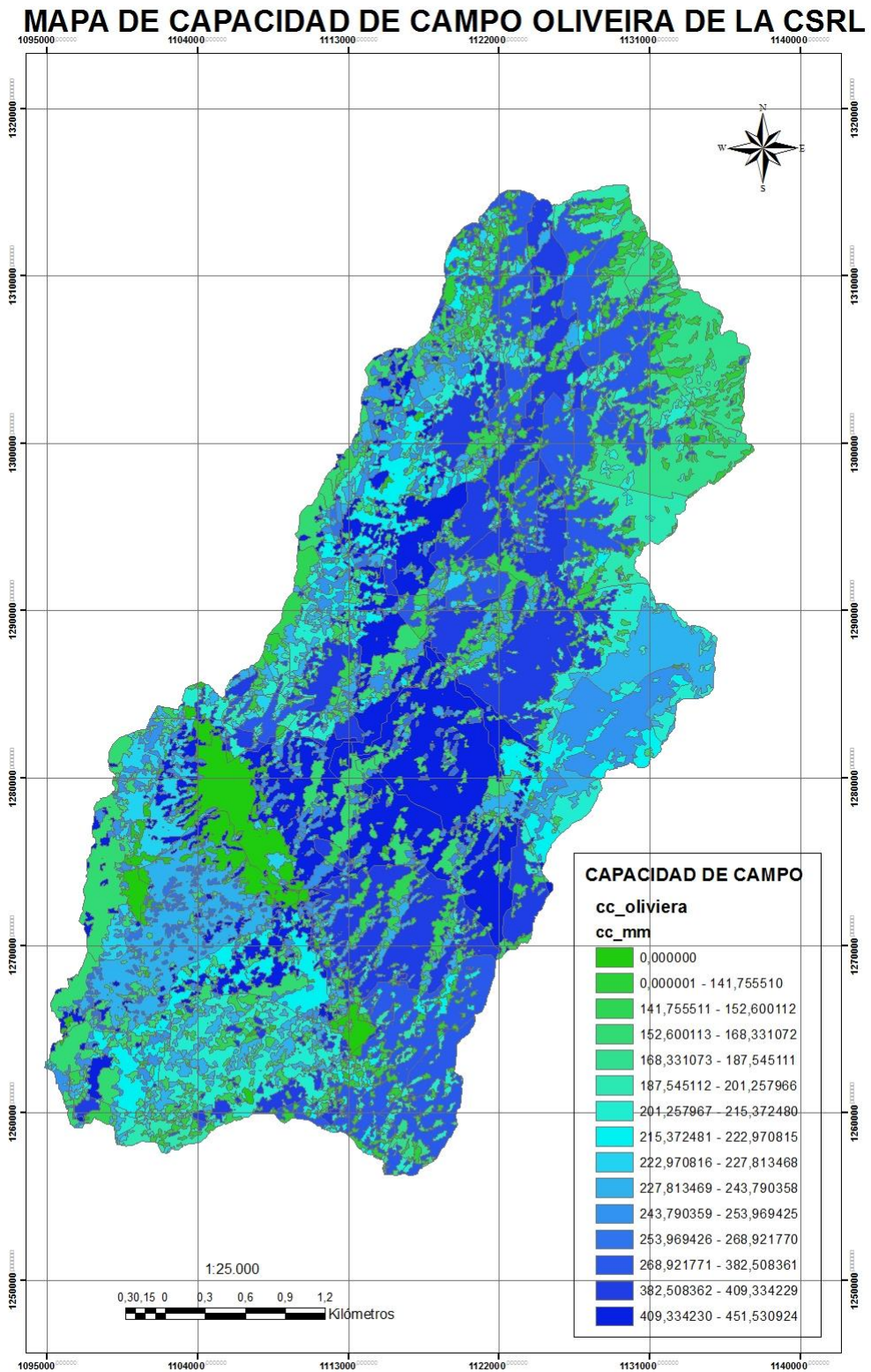
MAPA DE TIPO DE SUELO DE LA CSRL



Anexo C. Mapa de profundidad del suelo de la CSRL.



Anexo D. Mapa de capacidad de campo por el método de Oliveira de la CSRL.



Anexo E. Mapa de capacidad de campo por el método de Brooks-Corey de la CSRL.

MAPA DE CAPACIDAD DE CAMPO DE BROOKS-COREY DE LA CSRL

