

**DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE PROPIEDADES Y USOS DEL SUELO DE LA  
CUENCA SUPERIOR DEL RÍO LEBRIJA PARA SU UTILIZACIÓN EN LA  
ESTIMACIÓN DE LA RECARGA DE LOS ACUÍFEROS DE BUCARAMANGA**

**JHONATHAN CAMILO FUENTES SOLEDAD  
JULIÁN ALBERTO PRADA SUÁREZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO MECANICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2016**

**DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE PROPIEDADES Y USOS DEL SUELO DE LA  
CUENCA SUPERIOR DEL RÍO LEBRIJA PARA SU UTILIZACIÓN EN LA  
ESTIMACIÓN DE LA RECARGA DE LOS ACUÍFEROS DE BUCARAMANGA**

**JHONATHAN CAMILO FUENTES SOLEDAD  
JULIÁN ALBERTO PRADA SUÁREZ**

**Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Civil**

**Director  
SULLY GOMEZ ISIDRO  
Ph. D en ingeniería Civil**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO MECANICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2016**

## DEDICATORIA

En primer lugar le dedico este triunfo a Dios por permitirme culminar una etapa más en mi vida.

A mi madre María Isabel Suárez, mi padre Jairo Prada Ochoa, por su apoyo incondicional e inagotable paciencia, este logro es gracias a ustedes, no me alcanzan las palabras para demostrar mi gratitud y expresarles lo mucho que los quiero.

A mis hermanos, familia y amigos que estuvieron pendientes y acompañándome a lo largo de este proceso.

A bienestar universitario quien me brindó su ayuda constantemente.

Julian

*Este objetivo en mi vida profesional no hubiera sido posible sin Dios en mi vida, porque siempre está en cada paso que doy, por fortalecer mi fe e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de estudio*

*A mi madre, por el gran amor y la devoción que tienes por tus hijos, por el apoyo ilimitado e incondicional que siempre me has dado, por tener siempre la fortaleza de salir adelante sin importar los obstáculos, por haberme formado como un hombre de bien, y por ser la mujer que me dio la vida y me enseñó a vivirla.*

*A mi abuelo, porque has sido y serás siempre un ejemplo incuestionable de fortaleza, integridad, profesionalismo, sabiduría y responsabilidad.*

*A mi hermano Iván, mi mejor amigo, porque desde siempre hemos estado juntos, para apoyarnos, y demostrarnos la fe que nos tenemos uno del otro.*

*A mi hermano Sebastián, ya que es mi constante animo por crecer humana y profesionalmente, y lograr ser un apoyo incondicional en su vida.*

*A toda mi familia y amigos y especial a Rey quien a mediada del tiempo se convirtió en esa figura paterna que me hacía falta.*

*A Liz, la persona que Dios puso en mi camino, para bendecirme, apoyarme y creer en mis capacidades y potencializarlas, siempre agradecido con tu presencia.*

*Y gracias a todos los que nos brindaron su ayuda en este proyecto.*

**Jhonathan Camilo Fuentes Soledad**

## CONTENIDO

	Pág.
<b>INTRODUCCIÓN</b>	17
<b>1. MARCO TEÓRICO</b>	19
1.1 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA	19
1.2 CLIMA	20
1.3 SUBCUENCAS HIDROGRÁFICAS	20
1.4 GEOLOGÍA	21
1.5 SUELO	21
1.5.1 Uso de suelo	22
1.5.2 Tipo de suelo	22
1.5.3 Textura del suelo	22
1.5.4 Estructura del suelo	22
1.6 CLASIFICACIÓN A PARTIR DE IMÁGENES SATELITALES.	23
1.6.1 Clasificación Supervisada de imágenes satelitales	23
16.2 ArcGIS	24
1.6.2.1 Spatial Analyst	25
1.6.2.2 Clasificador Máximo Ajuste.	25
1.6.3 Imágenes satelitales	26
1.6.3.1 Composición de Bandas Satelitales	26
1.6.3.2 Combinación de bandas	28

1.6.4 Teledetección	29
1.6.5 Espectro electromagnético.	29
1.6.6 Firma espectral	29
<b>2. METODOLOGÍA</b>	<b>31</b>
2.1 METODOLOGÍA DE CLASIFICACIÓN DEL TIPO DE SUELO A PARTIR DE IMÁGENES SATELITALES	31
2.2 METODOLOGÍA DE CLASIFICACIÓN DE COBERTURA VEGETAL A PARTIR DE IMÁGENES SATELITALES	33
2.2.1 Base de datos de Corine Land Cover	33
2.2.2 Clasificación Supervisada.	35
2.2.2.1 Entrenamiento:	35
2.2.2.2 Clasificación:	35
2.3 METODOLOGÍA DE CLASIFICACIÓN DE USO DE SUELOS A PARTIR DE IMÁGENES SATELITALES	35
2.3.1 Clasificación Supervisada.	36
2.3.1.1 Entrenamiento:	36
2.3.1.2 Clasificación:	37
<b>3. METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACION DE CAPACIDAD DE CAMPO</b>	<b>38</b>
3.1 MÉTODOS PARA ESTIMAR LA CAPACIDAD DE CAMPO	38
3.1.1 Modelo Oliveira et al 2002	39
3.1.2 Método de Brooks-Corey	43
3.1.3 Método de van Genuchten	45
3.1.4 Método Dinámico Simplificado	47
<b>4. ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	<b>50</b>

4.1 MAPA DE TIPO DE SUELOS.	50
4.2 MAPA DE USOS DE SUELO.	52
4.3 MAPA DE COBERTURA VEGETAL	56
4.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE CAPACIDAD DE CAMPO	60
<b>5. CONCLUSIONES</b>	<b>63</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS</b>	<b>64</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>66</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>68</b>

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Localización Geográfica de la CSRL.	19
Figura 2. Esquema de clasificación supervisada	24
Figura 3. Sistema Multiespectral bidimensional	25
Figura 4. Proyección del sistema multiespectral bidimensional	26
Figura 5. Imagen Landsat 8 región de estudio.	27
Figura 6. Diagrama textural de la USDA	31
Figura 7. Etapa de entrenamiento	33
Figura 8. Relación valores estimados vs datos de campo para 10, 33, 1500 KPa modelo Rawls et al (1982).	40
Figura 9. Relación estimaciones vs datos de campo para 33, 1500 KPa modelo de Oliveira et al. (2002).	41
Figura 10. Triángulo de texturas de suelo de las 42 muestras tomadas en la CSRL.	42
Figura 11. Curva de retención de agua	43
Figura 12. Mapa de tipo de suelo de la CSRL (ver anexo 3)	50
Figura 13. Mapa de uso de suelo de la CSRL (ver anexo 4)	53
Figura 14: Cerros Orientales, al noreste de Floridablanca.	54
Figura 15: Cerros Orientales, al noreste de Floridablanca.	54
Figura 16. Cerros Orientales, al noreste de Floridablanca.	54
Figura 17. Valle del Río Suratá, Municipio de Suratá.	55
Figura 18. Valle del Río Suratá, Municipio de Suratá.	55
Figura 19. Valle del Río Suratá, Municipio de Suratá.	55
Figura 20. Mapa de cobertura vegetal de la CSRL (ver anexo 5).	57
Figura 21. Zona baja del Municipio de Lebrija.	58
Figura 22. Zona baja del Municipio de Lebrija.	58

Figura 23. Zona baja del Municipio de Lebrija.	58
Figura 24. Zona del Municipio de Vetas.	59
Figura 25. Zona del Municipio de Vetas.	59
Figura 26. Zona del Municipio de Vetas.	59
Figura 27: Análisis comparativo de capacidad de campo. (Anexo 7)	60

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Subcuencas Hidrográficas (CSRL)	20
Tabla 2. Combinación de Bandas Utilizadas para cada tipo de mapa a clasificar.	29
Tabla 3. Cuadro resumen de la información disponible (Ver anexo 1).	32
Tabla 4: Información Estadística de las 42 muestras tomadas en la zona.	32
Tabla 5. Categorías de Clasificación de Corine Land Cover	34
Tabla 6. Categorías de Clasificación propuesto por la CAS	36
Tabla 7: FPT de diferentes literaturas para diferentes usos del suelo.	39
Tabla 8. Parámetros Estadísticos	41
Tabla 9. Fuente de datos modelo Basado en la presión.	44
Tabla 10. Parámetros de los suelos HIDRUS 1-D Basado en Rawls et al (1982).	45
Tabla 11. Fuente de datos modelo Basado en la Presión.	46
Tabla 12. Parámetros de los suelos HIDRUS -1D basado en Carsel y Parrish (1988)	46
Tabla 13. Matriz de confusión clasificación de tipo de suelo.	51
Tabla 14. Áreas que abarcan los diversos tipos de suelo de la CSRL.	52
Tabla 15. Características para humedad de cada Textura de suelo (FAO)	61
Tabla 16. Clasificación de cobertura de tierras según metodología CORINE LAND COVER.	71

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
Anexo A. Ensayos utilizados sobre la CSRL.	68
Anexo B. Metodología CORINE LAND COVER.	71
Anexo C. Mapa de tipo de suelo de la CSRL.	74
Anexo D. Mapa de uso de suelo de la CSRL	75
Anexo E. Mapa de Cobertura Vegetal de la CSRL	76
Anexo F. Tabla resultados de capacidad de campo, por los métodos propuestos.	77
Anexo G. Análisis comparativo de capacidad de campo.	78
Anexo H. Mapa de Capacidad de Campo por el Método de Oliveira et al 2002.	79
Anexo I. Mapa de Capacidad de Campo por el Método de Brooks Corey.	80
Anexo J. Mapa de Capacidad de Campo por el Método de Van Genuchten.	81
Anexo K. Mapa de Capacidad de Campo por el Método de Dinámico Simplificado.	82

## RESUMEN

**TITULO:** DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE PROPIEDADES Y USOS DEL SUELO DE LA CUENCA SUPERIOR DEL RÍO LEBRIJA PARA SU UTILIZACIÓN EN LA ESTIMACIÓN DE LA RECARGA DE LOS ACUÍFEROS DE BUCARAMANGA

**AUTORES:** JHONATHAN CAMILO FUENTES SOLEDAD  
JULIÁN ALBERTO PRADA SUÁREZ\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Landsat 8, firma espectral, clasificación supervisada, capacidad de campo, conductividad hidráulica.

El presente artículo muestra el procedimiento desarrollado para la clasificación de tipo de suelo, cobertura vegetal y usos del suelo de la Cuenca Superior del Río Lebrija y la elaboración de sus respectivos mapas de distribución a partir de una imagen satelital del Landsat 8 OLI/TIR. Los mapas se realizaron mediante la herramienta de clasificación supervisada de imágenes satelitales en el programa ArcGis en su extensión Spatial Analyst. Se utilizaron 42 muestras de suelos realizadas por: Ingeominas, el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y la Corporación para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (C.M.D.B) para realizar la clasificación del tipo de suelo. Las categorías de clasificación para los mapas de cobertura vegetal y uso de suelo se definieron en base a la clasificación Corine Land Cover y la CAS, respetivamente. Se realizó una revisión literaria de la propiedad del suelo capacidad de campo, se propusieron cuatro métodos para su estimación; Los modelos empíricos de Brooks Corey y van Genuchten, el método dinámico simplificado y el modelo de Oliveira, los cuales se basan en la textura del suelo. Con los resultados obtenidos en la investigación de capacidad de campo y teniendo como base el mapa de tipo de suelo, se realizaron los cuatro mapas de distribución respectivos por cada método propuesto para la Cuenca Superior del Río Lebrija.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de Ingenieras Físico Mecánicas Escuela de Ingeniería Civil Director: Ph. D Sully Gomez Isidro

## ABSTRACT

**TITLE:** SPATIAL DISTRIBUTION OF PROPERTIES AND USES OF THE SOIL OF THE UPPER BASIN OF THE RIO LEBRIJA FOR USE IN THE ESTIMATION OF THE RECHARGE OF THE BUCARAMANGA AQUIFERES \*

**AUTHORS:** JHONATHAN CAMILO FUENTES SOLEDAD  
JULIÁN ALBERTO PRADA SUÁREZ\*\*

**KEY WORDS:** Landsat 8, spectral signature, supervised classification, field capacity, hydraulic conductivity.

This article shows the procedure developed for the classification of soil type, vegetable coverage and uses of the soil of the Upper Basin of the River Lebrija and the development of their respective distribution maps from a Landsat 8 oli / tir satellite image. Maps were carried out through the satellite image supervised classification tool in the ArcGis program at its spatial analyst extension. 42 samples of soils held by: Ingeominas, the Agustín Codazzi Geographical Institute (IGAC) and the Corporation for the Defense of the Bucaramanga Meseta (CDMB) to perform the classification of the type of soil. Classification categories for vegetable and soil use maps were defined based on the Corine Land Cover classification and the CAS, respectively. A literary review was make of the property of the soil field capacity was also performed, four methods for their estimation were proposed; the empirical models of Brooks -Corey and Van Genuchten, the simplified dynamic method and the Oliveira model, which are based on the soil texture. With the results obtained in the field capacity research and based on the type of soil map, the four respective distribution maps were performed for each proposed method for the Upper Basin of the River Lebrija.

---

\* Project of grade

\*\* Faculty of Mechanical Engineering Mechanical School of Civil Engineering Director: Ph. D Sully Gomez Isidro

## INTRODUCCIÓN

La Cuenca Superior del Río Lebrija está localizada en el departamento de Santander. En esta cuenca hidrográfica se encuentran los municipios de Piedecuesta, Girón, Floridablanca, Bucaramanga, Suratá, Charta, Vetas y Tona, con una población aproximada de 1155116 habitantes (2015), los cuales son beneficiarios de los recursos hídricos proporcionados por la cuenca y que son de vital importancia para el sostenimiento de sus actividades, agronómicas, ganaderas, domésticas, entre otras.

Revisando la información existente de la cuenca, se evidencia la necesidad de actualizar y crear información que garantice la sostenibilidad del recurso hídrico que se ve reflejada en factores geológicos y geomorfológicos como el uso y la textura del suelo.

Por lo mencionado con anterioridad se hace necesario realizar una clasificación de las propiedades de tipo de suelo, uso de suelo y cobertura vegetal que se evidenciarán en mapas de distribución. Permitiendo de esta manera obtener información clara y precisa con relación a estas propiedades que caracterizan la Cuenca Superior del Río Lebrija.

Con el propósito de dar cumplimiento a la presente necesidad el informe está estructurado de la siguiente manera.

Inicialmente se realiza la descripción de las características básicas de la Cuenca Superior del Río Lebrija (CSRL), seguidamente se presenta la metodología y los conceptos claves que permitirán establecer la clasificación y el mapeo de la cobertura vegetal, el tipo y uso del suelo presente en CSRL. Adicional a esto se

muestran cuatro métodos seleccionados para la estimación de la capacidad de campo y la generación de los mapas respectivos. Finalmente se describen los resultados y las conclusiones obtenidas en base a las metodologías descritas para la obtención de los mapas mencionados con anterioridad.

Es importante mencionar que para la realización de los entregables del proyecto, se utilizó el software ArcGIS 2.2 para el procesamiento de los datos, la clasificación supervisada y su posterior visualización y mapeo lo que facilitó la generación de los mapas en formato vectorial, tipo (Shape).

Los resultados obtenidos pueden ser utilizados fácilmente como insumos en la construcción de modelos hidrológicos (SWAT), modelos hidrogeológicos (MODFLOW), balances hídricos de corto plazo y necesidades de riego, entre otros.

## 1. MARCO TEÓRICO

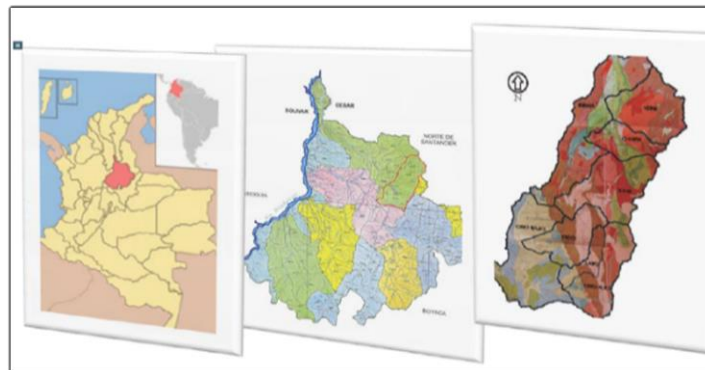
Este capítulo presenta una descripción de las características básicas de la Cuenca Superior del Río Lebrija (CSRL).

### 1.1 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

La CSRL se encuentra ubicada en el nororiente del departamento de Santander con una área aproximada de 1280 km<sup>2</sup>, ésta se encuentra ubicada en la provincia de Soto entre las coordenadas geográficas de Greenwich 6°52' 13,604" y 7°29'37,808" latitud norte y 73°16' 30,03"y 72° 46' 14,825 de latitud oeste [2].

En la figura 1 se observa la ubicación de la CSRL dentro del departamento de Santander y éste a su vez dentro del mapa de Colombia.

**Figura 1. Localización Geográfica de la CSRL.**



Fuente: A. Ulloa, S. Gómez, 2007.

La Cuenca comprende los siguientes municipios: Bucaramanga y su área metropolitana, California, Charta, Matanza, Piedecuesta, Suratá, Tona y Vetas, los cuales cuentan con una población aproximada de 1155116 habitantes (2015).

## 1.2 CLIMA

Dentro del aspecto climático de la Cuenca Superior del Río Lebrija cabe destacar que existe un ciclo anual de tendencia bimodal, en el que ocurren dos épocas de lluvia; la primera en los meses de Marzo, Abril y Mayo y la segunda en los meses de Septiembre, Octubre y Noviembre. La temperatura la (CSRL) presenta una temperatura media anual distribuida según la altura en un rango entre 10 y 27°C. [3]

## 1.3 SUBCUENCAS HIDROGRÁFICAS

En la tabla 1 se aprecia las cuatro subcuencas de la CSRL con sus respectivas áreas, así como su corriente principal y los municipios que las compone. [4]

**Tabla 1. Subcuencas Hidrográficas (CSRL)**

Subcuencas	Corriente Principal	Municipios	Área Km <sup>2</sup>
Río Suratá	Unión de los ríos Suratá, Vetas y Charta	Suratá, Matanza, Charta y Vetas	473
Río Tona	Río Tona	Tona y Bucaramanga	208
Río de Oro	Unión de los ríos de Oro y Lato	Piedecuesta y Floridablanca	468
Río Frío	Río Frío	Girón y Floridablanca	132

Fuente ULLOA A., GÓMEZ S., Memoria explicativa de la investigación geológica e hidrogeológica en el Macizo de Santander, tomo I, Bucaramanga 2007

## **1.4 GEOLOGÍA**

Estructuralmente la cuenca de estudio se encuentra afectada por el sistema de fallas Bucaramanga-Santa Marta, producto del estado tectónico compresivo regional, debido al choque entre las placas del Caribe y suramericana. Este movimiento genera desplazamientos rumbo-deslizantes en el noroeste de Suramérica.

La dirección aproximada de la falla principal es de N20 -30W buzando hacia el Oeste y enfrentando la zona en dos tipos de litologías diferenciadas, al Este el macizo de Santander y al Oeste una zona de abanicos aluviales.

Topográficamente en la Cuenca se distinguen 4 zonas que corresponden a formaciones geolitológicas diferentes:

- La zona montañosa al oriente formada por rocas ígneas en diferentes estados de meteorización
- La zona occidental formada por areniscas
- La formación Bucaramanga
- Los aluviones próximos a los ríos que forman la cuenca. [3]

## **1.5 SUELO**

El suelo según Hillel (1998) es un cuerpo natural involucrado en interacciones dinámicas con la atmósfera que está encima y con los estratos que están debajo, que influye el clima y el ciclo hidrológico del planeta y que sirve como medio de crecimiento para una variada comunidad de organismos vivos. Además, él juega un papel ambiental preponderante como reactor bio-físico-químico que

descompone materiales de desecho y recicla dentro de él nutrientes para la regeneración continua de la vida en la Tierra. [5].

**1.5.1 Uso de suelo** En términos generales el uso del suelo se refiere a la utilización que los seres humanos hacen sobre la tierra. El uso del suelo comprende la gestión y modificación del medio ambiente natural para luego ser convertido en un ambiente construido tal como campos de sembradío, pasturas y asentamientos humanos. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) explica que "El uso del suelo comprende los productos y/o beneficios que se obtienen del uso de la tierra como también las acciones de gestión del suelo (actividades) realizadas por los humanos para producir dichos productos y beneficios." [6]

**1.5.2 Tipo de suelo** Para poder realizar esta selección primero se debe ubicar al suelo dentro de un sistema taxonómico de clasificación que permita agrupar aquellos cuyas características y propiedades estén variando dentro de un rango de valores permisibles, donde se establezcan similitudes y diferencias y así se pueda pronosticar su comportamiento, definir su uso, calcular su productividad.

**1.5.3 Textura del suelo** La textura del suelo se refiere a las cantidades relativas de partículas de diverso tamaño que contiene el suelo, la textura del suelo es una de las de las características más permanentes y dependes de las características del material parental y, de los procesos de formación que sobre éste actúan. [7]

**1.5.4 Estructura del suelo** La estructura del suelo es una de las propiedades más importantes que posee el suelo, ya que la forma en que se ubiquen y ordenan las partículas primarias (arena, limo y arcilla), determina en gran parte la facilidad para trabajar los terrenos, la permeabilidad de éstos al agua y su resistencia a la erosión. [7]

## 1.6 CLASIFICACIÓN A PARTIR DE IMÁGENES SATELITALES.

El objetivo de éste capítulo es la identificación y clasificación pixel a pixel de las propiedades y usos del suelo para la Cuenca Superior del Río Lebrija (CSRL), mediante la extracción de información de imágenes satelitales Landsat 8 OLI/TIRS, la cual utiliza la información aislada de cada celda para encontrar regiones homogéneas.

El producto final consistirá en la obtención de tres mapas con la clasificación del tipo de suelo, cobertura vegetal y uso de suelo presente en la Cuenca Superior del Río Lebrija., que se utilizan para modelos hidrológicos e hidrogeológicos.

El proceso de clasificación se desarrolló siguiendo la metodología de clasificación supervisada, en el programa ArcGIS 10.2 a través de la extensión Spatial Analyst con el clasificador de máximo ajuste.

**1.6.1 Clasificación Supervisada de imágenes satelitales** La Clasificación Supervisada es una herramienta en la cual previamente se deben seleccionar muestras de cada clase. Esas zonas serán conocidas como zonas de entrenamiento y serán procesadas para identificar las cualidades espectrales y reconocer regiones con propiedades iguales. [8]

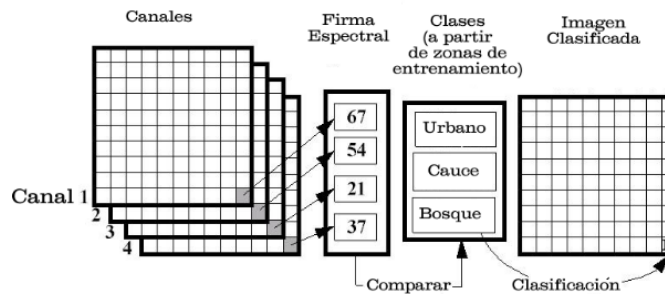
La clasificación será desarrollada en 4 fases:

- **Entrenamiento.** Consiste en seleccionar muestras en forma de zonas de píxeles que serán asignadas a una clase concreta basándose en información previa de la zona de estudio.
- **Clasificación:** el clasificador toma el conjunto de características de los píxeles para producir como salida una clase temática.

- **Post – Clasificación.** Esta fase nos permite realizar el filtraje de las imágenes, elimina puntos aislados o clasificados por fuera de su vecindad.
- **Mapeo.** Consiste en generar los mapas definitivos donde cada tema generado debe ser otorgado a una clase, en un modelo de datos temático.

Este procedimiento se puede observar en la figura 2:

**Figura 2. Esquema de clasificación supervisada**



Fuente: JEPRECIADO Teledetección II: Clasificación Espectral. [en línea] [Citado: 18 octubre de 2016] disponible en: <http://jepreciado.blogspot.com.co/>

**16.2 ArcGIS** Conjunto de productos de software en el campo de los Sistemas de Información Geográfica o SIG. Producido y comercializado por ESRI, bajo el nombre genérico ArcGIS se agrupan varias aplicaciones para la captura, edición, análisis, tratamiento, diseño, publicación e impresión de información geográfica. Estas aplicaciones se engloban en familias temáticas como ArcGIS Server, para la publicación y gestión web, o ArcGIS Móvil para la captura y gestión de información en campo.

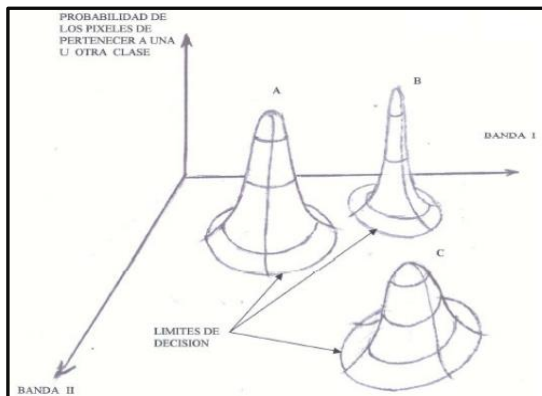
En el proyecto se utiliza la extensión Spatial Analyst. Tiene un conjunto completo de herramientas multivariante para realizar clasificaciones supervisadas y sin supervisión. [8]

**1.6.2.1 Spatial Analyst** En ArcGIS Spatial Analyst, es el conjunto de herramientas multivariante que proporciona las herramientas tanto para la clasificación supervisada como para la clasificación sin supervisión. La herramienta clasificación de probabilidad máxima Ajuste es el método de clasificación principal. [8]

**1.6.2.2 Clasificador Máximo Ajuste.** Es un algoritmo paramétrico, utiliza un modelo probabilístico, la distribución gaussiana para formular sus reglas de decisión en la categorización de los píxeles de clasificación. Es uno de los más empleados en la clasificación supervisada. [8].

En las figura 3 visualizamos un sistema multispectral bidimensional, donde el eje vertical mide la probabilidad de que un píxel esté contenido en alguna de las clases generando superficies en campana, una para cada clase.

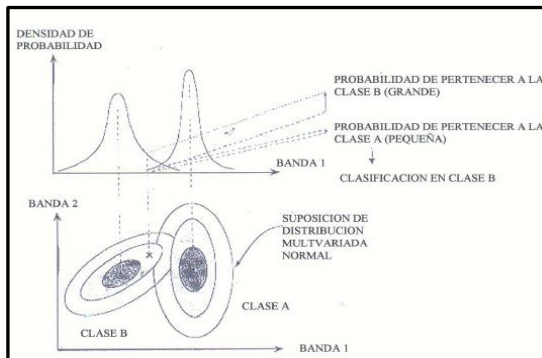
**Figura 3. Sistema Multispectral bidimensional**



Fuente: TELEDET Introducción a la percepción remota. [en línea] [Citado: 18 octubre de 2016]  
Disponible en: <http://www.teledet.com.uy/tutorial-imagenes-satelitales/imagenes-satelitales-tutorial.htm>

En la figura 4 se observa la proyección de superficies en campana sobre el plano espectral donde se genera dispersogramas de equiprobabilidad elipsoidales.

**Figura 4. Proyección del sistema multispectral bidimensional**



Fuente: TELEDET Introducción a la percepción remota. [en línea] [Citado: 18 octubre de 2016]  
Disponible en: <http://www.teledet.com.uy/tutorial-imagenes-satelitales/imagenes-satelitales-tutorial.htm>

**1.6.3 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). [8]

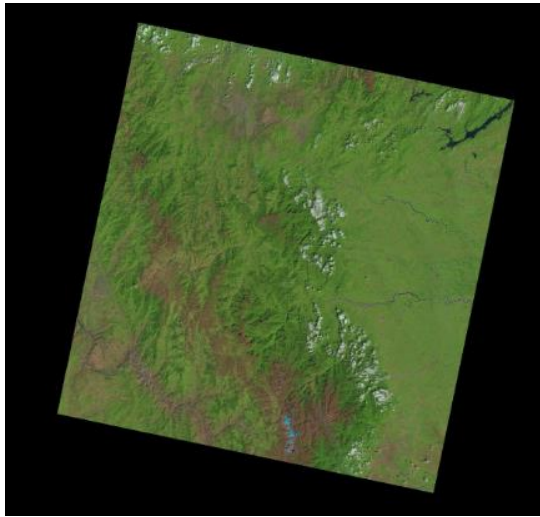
**1.6.3.1 Composición de Bandas Satelitales** Las imágenes Landsat ETM+ se encuentran compuestas por ocho diferentes bandas espectrales, cada una representada por una porción diferente del espectro electromagnético. A continuación se describen las características y utilidades de cada banda espectral. [9]

- Banda 1 (Azul, B) es muy útil para mapear cuerpos de agua, diferenciación entre suelo y vegetación.
- Banda 2 (verde, G) diseñada para evaluar el vigor de la vegetación sana, diferenciar tipos de rocas y medir la calidad de agua.

- Banda 3 (roja, R) permite determinar la absorción de clorofila, por ello es muy útil para la clasificación de la cubierta vegetal, agricultura y uso del suelo.
- Banda 4 (infrarrojo cercano, NIR) muy útil para la delimitación de cuerpos de agua, elaborar mapas geológicos y geomorfológicos.
- Banda 5 (infrarrojo medio, MIR) permite evaluar el contenido de humedad de la vegetación y suelo.
- Banda 6 (infrarrojo) permite determinar corrientes marinas, propiedades termales del suelo.
- Banda 7 (infrarrojo medio, MIR) especialmente discrimina rocas para el mapeo hidrotermal e identificación de minerales.
- Banda 8 (pancromática, pan) por su resolución permite que las imágenes generadas sean trabajadas para obtener ampliaciones hasta 1:25000.

En la figura 5 se muestra la imagen satelital escogida para la clasificación, de la fecha 16 de enero del 2016, debido a que la fecha coincide con un día de época seca y mínima nubosidad, lo cual permite mejor interpretación.

**Figura 5. Imagen Landsat 8 región de estudio.**



**1.6.3.2 Combinación de bandas** La información de dichas bandas puede ser combinada de distintas formas para obtener diversas alternativas de color u opciones de procesamiento. Cada una de las bandas contiene una imagen con una cobertura de 30x30 metros de terreno por cada pixel. [9]

Los captadores a bordo del satélite Landsat recogen datos en 7 bandas del espectro electromagnético. Los distintos elementos de la superficie terrestre pueden destacarse usando combinaciones apropiadas de estas bandas.

Las bandas concretas que se emplean en las combinaciones de tres bandas se suelen identificar dándoles números a cada banda, en un orden específico. De esta manera, una imagen que use la banda seis para el infrarrojo, la banda cinco para el infrarrojo medio y la banda cuatro para el infrarrojo cercano se designaría (6,5,4).

Con esta combinación espectral la cubierta vegetal aparece claramente diferenciada del resto de elementos. [9]

En la tabla 2 se muestra el nombre y tipo de combinación de bandas utilizadas en el proyecto, como su respectiva utilización en los mapas realizados.

**Tabla 2. Combinación de Bandas Utilizadas para cada tipo de mapa a clasificar.**

COMBINACIÓN DE BANDAS	MAPAS
Color infrarrojo 5 4 3	Tipo de suelo
Falso color o color verdadero 4 3 2	Cobertura vegetal y uso de suelos
Análisis de vegetación. 6 5 4	

**1.6.4 Teledetección** 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. La teledetección tiene como objetivo la identificación adquisición de datos de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales.

**1.6.5 Espectro electromagnético.** Es la distribución energética del conjunto de las ondas electromagnéticas, se refiere a que un objeto se define por la radiación electromagnética que emita. El espectro se extiende desde la radiación de menor longitud de onda, hasta las ondas electromagnéticas de mayor longitud como son las de radio.

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.

**1.6.6 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.

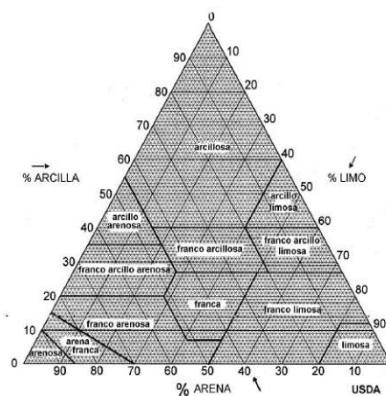
## 2. METODOLOGÍA

Se presenta la metodología y conceptos que permitieron obtener la clasificación y mapeo de tipo de suelo, uso de suelo y cobertura vegetal presente en CSRL. También se presentan los cuatro métodos elegidos para la estimación de la capacidad de campo y la elaboración de sus respectivos mapas.

### 2.1 METODOLOGÍA DE CLASIFICACIÓN DEL TIPO DE SUELO A PARTIR DE IMÁGENES SATELITALES

Para el desarrollo del mapa de tipo de suelo 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 6 basándose principalmente en los porcentajes de arcilla, limo y arena.

**Figura 6. Diagrama textural de la USDA**



Fuente: BERGSLIEN E., An introduction to forensic geoscience, edition first, Wiley-Blackwell, USA 2012, pp 252.

Para el desarrollo del mapa se aplicó la clasificación supervisada ya descrita anteriormente.

En el proceso de entrenamiento se utilizaron, 42 datos de campo realizados por diferentes entidades de la región los cuales se asume que representan de manera apropiada cada una de las clases texturales presentes en la CSRL.

En la tabla 3 se muestra el número de datos texturales disponibles de CSRL.

**Tabla 3. Cuadro resumen de la información disponible (Ver anexo 1).**

Entidad	Número de Datos
IGAC	11
CDMB	2
Ingeominas	29
Total	42

La tabla 4 muestra la distribución de tamaño de partículas en porcentajes de arena, limo y arcilla de los datos de campo.

**Tabla 4: Información Estadística de las 42 muestras tomadas en la zona.**

Tipos de Suelo	Cantidad de Ensayos	% Arcilla	% Limo	% Arena
Franco Arenoso	3	15.33	28	56.67
Franco Arcillo Arenoso	4	22	20	58
Areno Arcilloso	2	42.5	7.5	50
Arcilloso	33	63.16	17.51	19.31

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 en este caso los datos de campo tal como se aprecia en la figura 7:



En la tabla 5, en resaltado color azul se muestra las cinco categorías de cobertura vegetal utilizadas para la clasificación.

**Tabla 5. Categorías de Clasificación de Corine Land Cover**

CATEGORÍAS DE CLASIFICACIÓN
1. TERRITORIOS ARTIFICIALIZADOS
1.1. Zonas urbanizadas
2. TERRITORIOS AGRÍCOLAS
2.3. Pastos
2.4. Áreas agrícolas heterogéneas
2.4.1 Cultivos
3. BOSQUES Y ÁREAS SEMINATURALES
3.1. Bosques
3.3. Áreas abiertas, sin o con poca vegetación
3.3.1 Áreas Erosionadas.

**Zonas Urbanas:** Es el tipo de uso correspondiente a aquellas dedicadas a la construcción vivienda e infraestructura urbana actual.

**Pastos:** Comprende Pastos Naturales, son pastizales con presencia de formaciones vegetales abrasivas y herbáceas asociadas.

**Cultivos:** Comprende, cultivos mixtos, áreas agrícolas, son cultivos que mezcla semipermeables, permeables y transitorios.

**Bosques:** Agrupa, Bosques primario, secundario y plantado.

**Áreas Erosionadas:** Comprende áreas con alto grado de erosión de tipo hídrico y áreas en erosión de tipo antrópico por uso intensivo de las tierras.

**2.2.2 Clasificación Supervisada.** Para el desarrollo del mapa de cobertura vegetal se aplicó la clasificación supervisada descrita en el numeral (3.1.1).

**2.2.2.1 Entrenamiento:** A partir de la interpretación de la imagen e información previa de la zona de estudio, se marcan puntos sobre la imagen y se asigna un valor numérico para cada categoría.

Se crea una firma espectral con los puntos asignados en la imagen.

**2.2.2.2 Clasificación:** Para el proceso de clasificación se utilizó la combinación de bandas 4 3 2 correspondiente a falso color o color verdadero, ya que la combinación de análisis de vegetación 6 5 4 presentaba similitudes en la tonalidad de la marca espectral de varias zonas.

Finalmente para realizar la clasificación se usó el clasificador estadístico máximo ajuste o máxima verosimilitud, se genera el mapa en formato vectorial con las cinco categorías definidas distribuidas en la cuenca.

## **2.3 METODOLOGÍA DE CLASIFICACIÓN DE USO DE SUELOS A PARTIR DE IMÁGENES SATELITALES**

Para el desarrollo del mapa de uso de suelo se definieron las categorías para clasificar, a partir de la resolución 1432 de Corporación Autónoma Regional de Santander CAS. [11]

En la tabla 6, se muestra las cinco categorías de uso de suelo utilizadas para la clasificación.

**Tabla 6. Categorías de Clasificación propuesto por la CAS**

<b>CATEGORÍAS USO DE SUELO</b>
Zonas Urbanas
Cultivos Agropecuario
Cultivos agroforestal
Suelos Eriales
Bosques

**Zonas Urbanas:** Es el tipo de uso correspondiente a aquellas dedicadas a la construcción vivienda e infraestructura urbana actual.

**Cultivos Agropecuario:** Comprende, áreas con actividades agrícolas y pecuarias, referenciándose como tierras mixtas por la dificultad de establecer su uso principal.

**Cultivos agroforestal:** Comprende a sistemas silvoagrícolas o tierras en cultivos establecidos con algún porcentaje de cobertura de árboles entre los que se observan: Cultivos agrícolas de caña panelera con sistemas arbolados, cultivos de café con sombrío o fajas de árboles protectores.

**Suelos Eriales:** Comprende áreas con alto grado de erosión de tipo hídrico y áreas en erosión de tipo antrópico por uso intensivo de las tierras.

**Bosques:** Agrupa, Bosques primario, secundario y plantado.

**2.3.1 Clasificación Supervisada.** Para el desarrollo del mapa de Cobertura Vegetal se aplicó la clasificación supervisada descrita en el numeral (3.1.1).

**2.3.1.1 Entrenamiento:** A partir de la interpretación de la imagen e información previa de la zona de estudio, se marcan puntos sobre la imagen y se asigna un valor numérico para cada categoría.

Se crea una firma espectral con los puntos asignados en la imagen.

**2.3.1.2 Clasificación:** Para el proceso de clasificación se utilizó la combinación de bandas 4 3 2 correspondiente a falso color o color verdadero, ya que la combinación de análisis de vegetación 6 5 4 presentaba similitudes en la tonalidad de la marca espectral de varias zonas.

Finalmente para realizar la clasificación se usó el clasificador estadístico máximo ajuste o máxima verosimilitud, se genera el mapa en formato vectorial con las cinco categorías definidas distribuidas en la cuenca.

### **3. METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACION DE CAPACIDAD DE CAMPO**

La definición clásica de capacidad de campo es la propuesta por Veihmeyer y Hendrickson (1931), donde define a la capacidad de campo como la cantidad de agua en el suelo después de que el exceso de agua se ha drenado, y la velocidad de movimiento descendente de agua ha disminuido sustancialmente, que generalmente tiene lugar en un plazo de dos a tres días después de un evento de lluvia o riego en suelos permeables de estructura y textura uniforme. [1]. Esta propiedad es importante debido a que permite determinar el agua disponible para las plantas, para los balances de agua en suelo, en la gestión de riego así como para la modelación hidrológica y estudios hidrogeológicos.

#### **3.1 MÉTODOS PARA ESTIMAR LA CAPACIDAD DE CAMPO**

Inicialmente se realizó una búsqueda en la web y en las bases de datos de la Universidad Industrial de Santander, tales como ScienceDirect, Web of Science, American Society of Civil Engineers (ASCE), para obtener información sobre los métodos existentes que permitieran estimar la capacidad de campo, como resultado de esta primera búsqueda se definieron los métodos de Van Genuchten y el método dinámico simplificado. Adicional a esto se realizó una búsqueda en el catálogo bibliográfico de la biblioteca de la Universidad Industrial de Santander con el propósito de consultar las tesis de grado que trataban el tema de estudio del presente artículo, de esta manera se obtuvo una perspectiva global del tema y se definieron los métodos de Oliveira et al 2002 y el método de Brooks – Corey, propuesto en la tesis de grado titulada “Estimación de la Capacidad de Campo en la Cuenca Superior del Río Lebrija” elaborada por Adriana Sierra y Andrés Velandia.

Los cuatro métodos investigados se basaron en los datos suministrados por las entidades mencionadas en la tabla 3, por las bases de datos de las tablas 11 y 13. Con los datos de entrada se pudo realizar la estimación de la capacidad de campo para el presente proyecto.

**3.1.1 Modelo Oliveira et al 2002** Una función de transferencia edafológica o FPT (por sus siglas en inglés) es una relación matemática entre dos o más variables de suelo relativamente fáciles de obtener y propiedades del mismo cuya obtención experimental es más complicada, ya sea por su costo o por el tiempo que insume. Los datos generalmente disponibles para los suelos agrícolas son textura, contenido de materia orgánica y densidad aparente. Otras propiedades, como las hidráulicas, son más difíciles de conseguir y su determinación en el campo demanda más tiempo.

Debido a esto se han desarrollado diversas FPT para estimar propiedades hidráulicas de los suelos. [12]

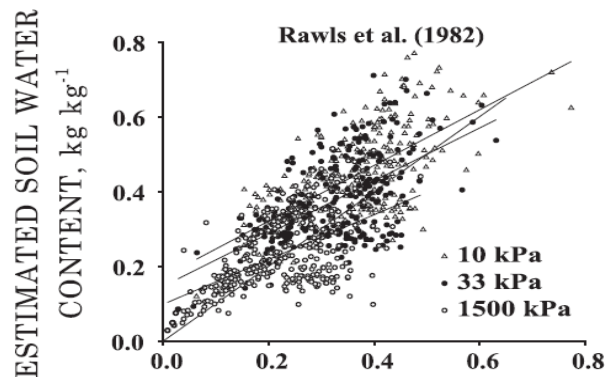
Como se observa en la tabla 7 existen varios modelos de FPT para el cálculo de la capacidad de campo basados en la textura del suelo, para seleccionar el mejor se tuvo en cuenta la información presente y la precisión con los valores de campo.

**Tabla 7: FPT de diferentes literaturas para diferentes usos del suelo.**

Fuente 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	$\theta \text{ (m}^3/\text{m}^3) = 0,258 - 0,002 * \text{arena} + 0,0036 * \text{arcilla} + 0,0299 * \text{MO}$
Grupia & Larson (1979)	EE.UU	$\theta \text{ (m}^3/\text{m}^3) = 0,00308 * \text{arena} + 0,00804 * \text{limo} + 0,00221 * \text{MO} - 1,43 * \text{da}$

La mayoría de los FPT, fueron desarrolladas en suelos de clima templado, éstas FPT no muestran buenos resultados en suelos tropicales como se refleja en la figura 8 pues sobreestiman la capacidad de campo y se obtiene gran dispersión en relación con los valores reales.

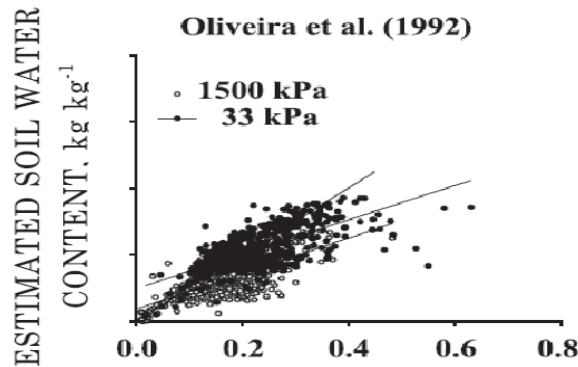
**Figura 8. Relación valores estimados vs datos de campo para 10, 33, 1500 KPa modelo Rawls et al (1982).**



Fuente: 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 pp.8-9

Esto ocurre debido a las diferencias mineralógicas entre los suelos tropicales y las zonas de clima templado [13], por lo cual se decidió utilizar una FPT en el que hayan sido realizadas en base a observaciones elaboradas en condiciones climáticas semejantes a las de los suelos de la zona de estudio tal como ocurre en la figura 9.

**Figura 9. 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, "Estimation of water retention and availability in soils of Rio Grande do Sul," R. Bras. Ci. Solo, vol 33, 2009 pp.8-9.

Este modelo tiene un comportamiento sobresaliente frente a otras FPT, presenta un MSE (error medio cuadrático) cercano a cero (tabla 8), 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.

**Tabla 8. Parámetros Estadísticos**

Modelo	n	R <sup>2</sup>	MSE
Oliveira et al (2002)	684	0,46	0,0019
Masutti (1997)	684	0,46	0,0024
Arruda et al. (1986)	684	0,38	0,0046
Rawls et al (1982)	293	0,34	0,0085
Grup ta & Larson (1979)	293	0,26	0,0109

Fuente: 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 pp.8-9.

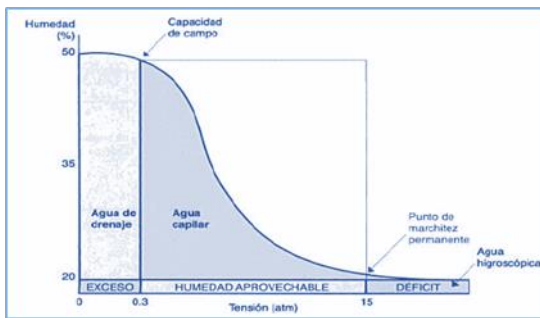
Para estimar la capacidad de campo se basa en regresiones lineales que están en función de la textura del suelo, como se observa en la tabla 9, la selección de este



Para su estimación se parte de la relación de arena, limo y arcilla, presentes en el triángulo de texturas del suelo y en los datos texturales de la tabla 9.

**3.1.2 Método de Brooks-Corey** |El método basado en la presión fue introducido por Richards y Weaver (1944) para estimar la capacidad de campo con el contenido de agua del suelo a un potencial mátrico de  $-1/3$  bar (equivalente a  $-33$  KPa y  $-348$  cm de columna de agua) basado en sus experimentos de laboratorio. La elección del bar  $-1/3$  fue confirmada en un estudio posterior por Colman (1947) [15]. La capacidad de campo definida por el potencial mátrico varía con la textura del suelo, dependiendo de las características de retención de agua de suelo como se observa en la figura 11:

**Figura 11. Curva de retención de agua**



Fuente: V. Juan, Riego y drenaje, primera edición, Universidad Estatal a Distancia, Costa Rica, 1998, p.49

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

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

Donde  $\theta_{fc}$  es la capacidad de campo volumétrica en  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ,  $\psi_{fc}$  potencial matricial a capacidad de campo en cm,  $\psi_{ae}$  potencial de entrada de aire en cm,  $\theta_s$

contenido de agua saturada en  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ,  $\theta_r$  contenido de agua residual en  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$  y  $b$  es el índice de distribución de tamaño de poros parámetro adimensional [15].

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.

Por lo tanto para la determinación de dichos parámetros existe la oportunidad de apoyarse en las funciones de edafotransferencia realizadas a partir de grandes bases de datos en la comunidad internacional (Schapp et al. 2001) como la base de datos de propiedades hidráulicas de suelos no saturados (UNSODA, Leji 1996), la base de datos de las propiedades hidráulicas de los suelos Europeos (Hypress, Wosten et al. 1999) y el inventario mundial de emisiones potenciales de suelo (Wise, Baties; 1996).

Los parámetros para el desarrollo del modelo proveniente de dos fuentes (tabla 9).

**Tabla 9. Fuente de datos modelo Basado en la presión.**

n	Fuente Literaria
1845 Muestras	Digman (1994) Basado en Clap y Horberger (1978)
2541 Muestras	Software HIDRUS -1D Basado en Rawls et al (1982)

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 10.

**Tabla 10. Parámetros de los suelos HIDRUS 1-D Basado en Rawls et al (1982).**

TIPO DE SUELO	HYDRUS-BC					
	$\theta_r$ (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	$\theta_s$ (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	Ks (cm/d)	$\Psi_{ae}$ (cm)	<i>b</i>	<i>c</i>
Arena	0.020	0.417	504.0	7.25	1.69	6.38
Areno arcilloso	0.035	0.401	146.6	8.70	2.11	7.22
Franco Areno Arcilloso	0.041	0.412	62.2	14.66	3.11	9.21
Franco	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	0.330	10.3	28.09	4.00	11.00
Franco Arcilloso	0.075	0.390	5.5	25.91	5.15	13.31
Franco Arcillo Limoso	0.040	0.432	3.6	32.57	6.62	16.25
Arcillo Arenoso	0.109	0.321	2.9	29.15	5.95	14.90
Arcillo Limoso	0.056	0.423	2.2	34.25	7.87	18.75
Arcilla	0.090	0.385	1.4	37.31	7.63	18.27

Fuente: 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, pp. 356.

**3.1.3 Método de van Genuchten** El método basado en la presión fue introducido por Richards y Weaver (1944) para estimar la capacidad de campo con el contenido de agua del suelo a un potencial mátrico de -1/3 bar (equivalente a -33 KPa y -348 cm de columna de agua) basado en sus experimentos de laboratorio. La elección del bar -1/3 fue confirmada en un estudio posterior por Colman (1947) [15]. La capacidad de campo definida por el potencial mátrico varía con la textura del suelo. La ecuación que determina la capacidad de campo para el modelo de van Genuchten es:

$$\theta_{fc} = [(-\alpha \psi_{fc})^n + 1]^{-m}$$

$$(\theta_s - \theta_r) + \theta_r$$

Donde  $\theta_{fc}$  es la capacidad de campo en  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ , y  $\psi_{fc}$  es el potencial mático correspondiente en  $\text{cm}^{-1}$ ,  $\alpha$  es valor inverso al potencial de entrada de aire en  $\text{cm}^{-1}$ , finalmente  $n$  y  $m$  son parámetros adimensionales de la forma  $m = 1 - 1/n$ .

Los parámetros para el desarrollo de este modelo provienen de dos fuentes (tabla 11).

**Tabla 11. Fuente de datos modelo Basado en la Presión.**

n	Fuente Literaria
1578 Muestras	Tawarakavi et al (2009)
2541 Muestras	Software HIDRUS -1D Basado en Carsel y Parrish (1988)

La estimación de la capacidad de campo se basó en la información del Software HIDRUS -1D basado en Carsel y Parrish (1988), cuyos parámetros se muestran en la tabla [12]

**Tabla 12. Parámetros de los suelos HIDRUS -1D basado en Carsel y Parrish (1988)**

TIPO DE SUELO	HYDRUS-vG				
	$\theta_r$ $\text{cm}^3/\text{cm}^3$	$\theta_s$ $\text{cm}^3/\text{cm}^3$	$\alpha$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	$n$	$K_s$ ( $\text{cm}/\text{d}$ )
Arena	0.045	0.430	0.145	2.68	712.8
Areno arcilloso	0.057	0.410	0.124	2.28	350.2
Franco Areno Arcilloso	0.065	0.410	0.075	1.89	106.1
Franco	0.078	0.430	0.036	1.56	25.0
Limo	0.034	0.460	0.016	1.37	6.0
Franco Limoso	0.067	0.450	0.020	1.41	10.8
Franco Arcillo Arenoso	0.100	0.390	0.059	1.48	31.4
Franco Arcilloso	0.095	0.410	0.019	1.31	6.2

TIPO DE SUELO	HYDRUS-vG				
	$\theta_r$ cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>	$\theta_s$ cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>	$\alpha$ (cm <sup>1</sup> )	$n$	$K_s$ (cm/d)
Franco Arcillo Limoso	0.089	0.430	0.010	1.23	1.7
Arcillo Arenoso	0.100	0.380	0.027	1.23	2.9
Arcillo Limoso	0.070	0.360	0.005	1.09	0.5
Arcilla	0.068	0.380	0.008	1.09	4.8

Fuente: 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, pp. 356.

**3.1.4 Método Dinámico Simplificado** El método dinámico simplificado está basado en el cambio de almacenamiento de agua de suelo, en condiciones de capacidad de campo, el agua es contenida en una columna de suelo de espesor  $D$ , el almacenamiento de agua es de  $\theta_{fc} D$ , con una hipótesis de un perfil homogéneo del suelo, el cambio de almacenamiento de agua del suelo sobre una unidad de tiempo es  $K_{fc}$ . Si definimos la tasa de drenaje relativa como un porcentaje pequeño (como el 1% por día) del almacenamiento del agua en las condiciones de capacidad de campo. [15]

La capacidad de campo puede ser estimada utilizando:

$$\frac{K_{fc}}{\theta_{fc} D} = \delta$$

Dónde  $\delta$  es la tasa relativa de drenaje en  $d^{-1}$  donde  $\theta_{fc}$  es la capacidad de campo volumétrica en  $cm^3/cm^3$ , Donde  $K_{fc}$  es la conductividad hidráulica no saturada del suelo,  $D$  es el espesor de columna de suelo en cm.

Para la estimación de la capacidad de campo se hará uso del el modelo de Brooks – Corey basado en la presión con la siguiente fórmula

$$\delta = \frac{K_s * \left( \frac{\theta_{fc} - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^c}{\theta_{fc} * D}$$

Donde  $\theta_{fc}$  es la capacidad de campo volumétrica en  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ,  $K_s$  es la conductividad hidráulica saturada del suelo en  $\text{cm/d}$ ,  $\theta_s$  contenido de agua saturada en  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ,  $\theta_r$  contenido de agua residual en  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ,  $c$  es el índice de desconexión de poros adimensional,  $\delta$  es la tasa relativa de drenaje en  $\text{días}^{-1}$ ,  $D$  es el espesor de columna de suelo en  $\text{cm}$ .

Para un suelo dada su textura y una tasa relativa de drenaje  $\delta$ , la estimación de capacidad de campo es afectada por el espesor de la columna de suelo. En el experimento de Veihmeyer y Hendrickson (1931), el grueso de la columna de suelo fue 1  $\text{cm}$ , ya que era más razonable asumir el contenido de agua del suelo uniforme cuando el grueso de la columna de suelo era pequeño, en este método se usará una tasa relativa de drenaje del  $\delta$  del 3% por día ideal para los métodos basados en presión.

Veihmeyer y Hendrickson (1931), expresan que la capacidad de campo es la cantidad de agua en el suelo después de que el exceso de agua se ha drenado, y la velocidad de movimiento descendente de agua ha disminuido sustancialmente, que generalmente tiene lugar en un plazo de dos a tres días después de un evento de lluvia o riego equivalente a un potencial mátrico cerca de  $-1/3$  bar, que es un valor generalmente usado en el método basado en la presión para la mayoría de los suelos adecuado para el cultivo de plantas, tales como los arenosos, limos, franco y de franco arcillosos.

Según este análisis la capacidad de campo puede ser calculada con el método de ensayo y error cuando  $K_s$ ,  $\theta_s$ ,  $\theta_r$  parámetros en el BC son conocidos observados

en la tabla 10, y tomando un espesor de columna de suelo D de 1 cm y a una tasa relativa de drenaje del  $\delta$  del 3% por día.

## 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

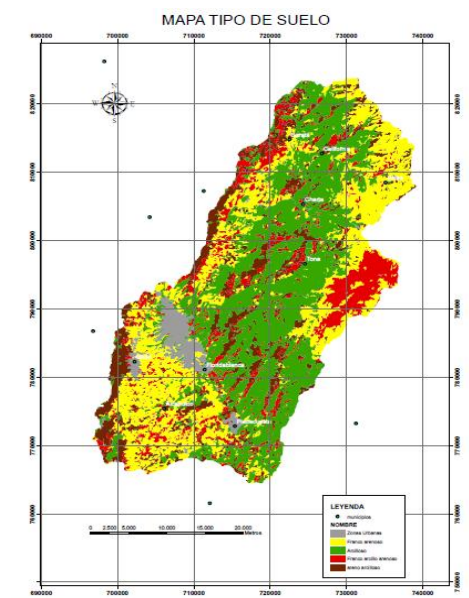
En este capítulo se describen los resultados obtenidos a partir de las metodologías descritas para la obtención de los mapas de tipo de suelo, uso de suelo y cobertura vegetal, así como los cuatro mapas de capacidad de campo de la cuenca superior del río Lebrija.

Los mapas son los resultados de un proceso de validación por medio de matriz de confusión y observación visual con sensores remotos.

### 4.1 MAPA DE TIPO DE SUELOS.

Se obtuvo el mapa de tipo de suelo de acuerdo a metodología descrita en el numeral (3.1) el cual se observa en la figura 12.

**Figura 12. Mapa de tipo de suelo de la CSRL (ver anexo 3)**



En la tabla 14 se muestra la matriz de confusión obtenida después de la clasificación supervisada hecha por el software ArcGIS, utilizando los 42 datos de campo.

Los valores en la diagonal principal muestran el porcentaje de datos que fue clasificado correctamente con respecto a los 42 datos de campo o de entrenamiento, por ejemplo para el suelo arcilloso el 62 % de los datos de entrenamiento fue clasificado como arcilloso.

Los valores fuera de la diagonal principal por ejemplo en la fila 1 columna 2 indican que el 7 % de los datos que pertenecían a la clase textural franco arenoso fueron clasificados como zona urbana; así del mismo modo para los demás datos.

El método de clasificación presento un buen comportamiento, ya que el promedio de la diagonal principal es de 64,35 %, se considera que el clasificador tuvo buen rendimiento (mayor al 60%).).

**Tabla 13. Matriz de confusión clasificación de tipo de suelo.**

TIPO	Urbano	Franco arenoso	Arcilloso	Franco arcillo arenoso	Areno arcilloso
Urbano	100%	7%	0%	0%	10%
Franco arenoso	0%	50%	12%	0%	20%
Arcilloso	0%	14%	62%	20%	10%
Franco arcillo arenoso	0%	14%	9%	60%	10%
Areno arcilloso	0%	14%	18%	0%	50%
Promedio de la Diagonal Principal					64,35

En la tabla 14 muestra las áreas clasificadas para cada categoría textural, obteniéndose un área total de 1336,3 km<sup>2</sup> el cual es muy cercano al área dado por Ingeominas el cual es de 1340 km<sup>2</sup>.

**Tabla 14. Áreas que abarcan los diversos tipos de suelo de la CSRL.**

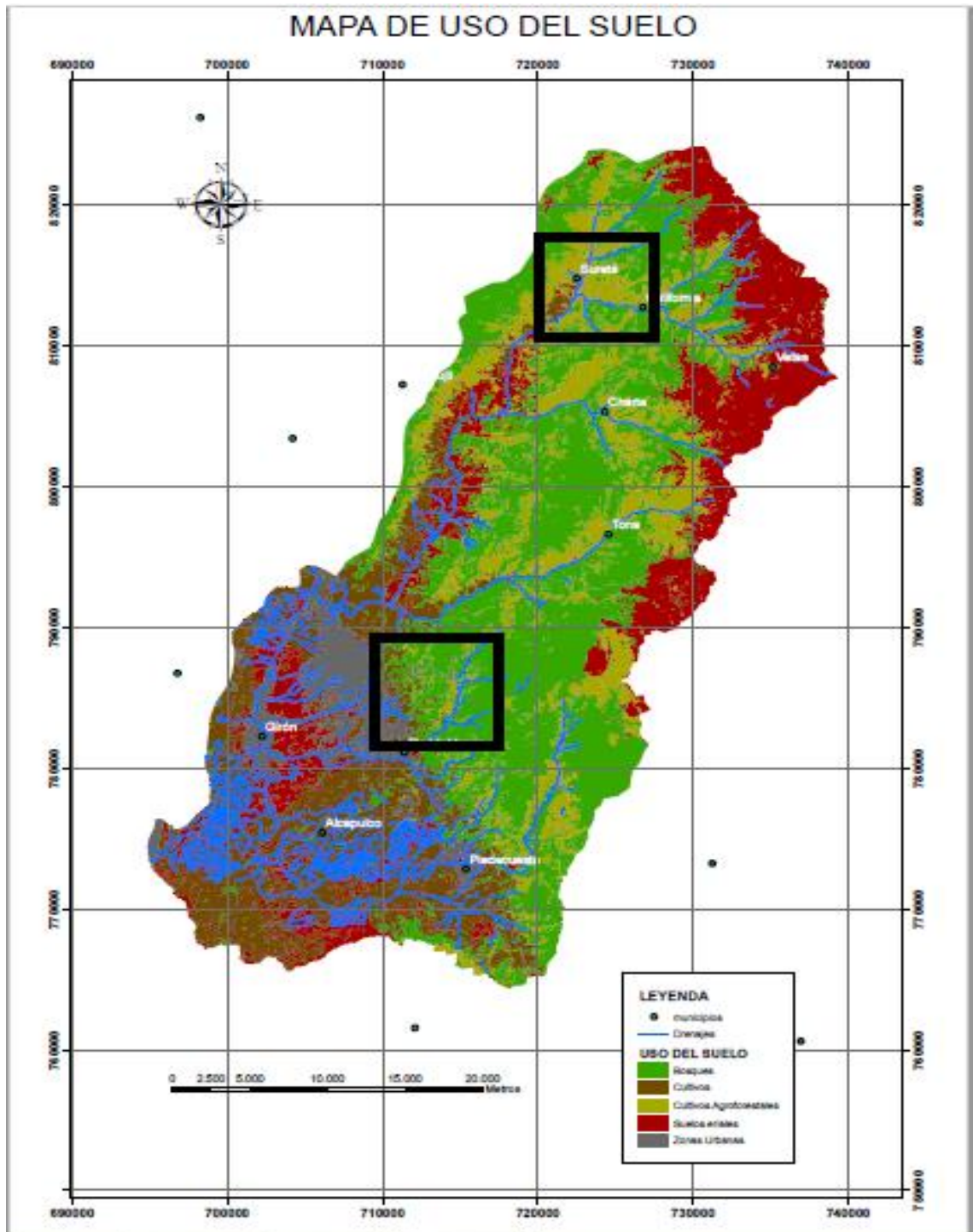
<b>Tipo de Suelo</b>	<b>Área (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>%</b>
Urbano	50	4%
Franco Arenoso	356	27%
Arcilla	505	38%
Franco Arcillo Arenoso	207	15%
Areno Arcilloso	220	16%
Área total	1336	100%

#### **4.2 MAPA DE USOS DE SUELO.**

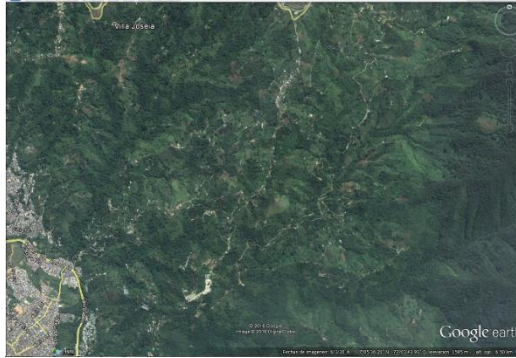
Para dicha validación se tomaron dos puntos sobre la zona de estudio, cerros orientales en Municipio de Floridablanca y Valle de Suratá en el Municipio de Suratá. En cada punto se recortaron dos imágenes obtenidas de la plataforma remota Google Earth y la imagen Landsat 8 ( Color Real ) respectivamente y se compararon con la imagen del Mapa de Clasificación obtenido.

Las Imágenes se encuentran en Escala 1:25000.

Figura 13. Mapa de uso de suelo de la CSRL (ver anexo 4)



**Figura 14: Cerros Orientales, al noreste de Floridablanca.**



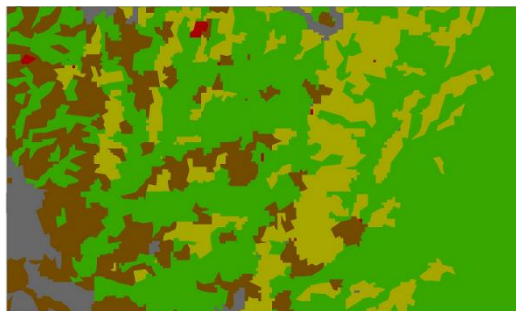
Fuente Google Earth

**Figura 15: Cerros Orientales, al noreste de Floridablanca.**



Fuente: Imagen Landsat 8. Color Real

**Figura 16. Cerros Orientales, al noreste de Floridablanca.**

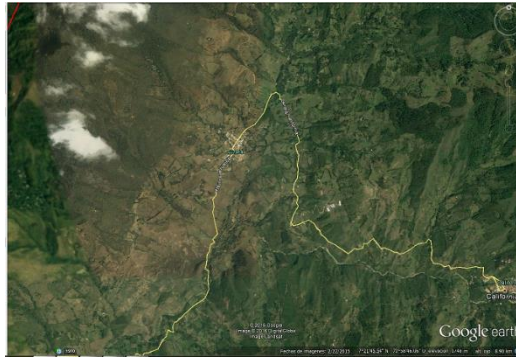


Fuente Mapa de Clasificación Usos de Suelo.

En la figuras 14, 15 y 16 muestran una zona de combinación de cultivos, cultivos agroforestales y Bosques.

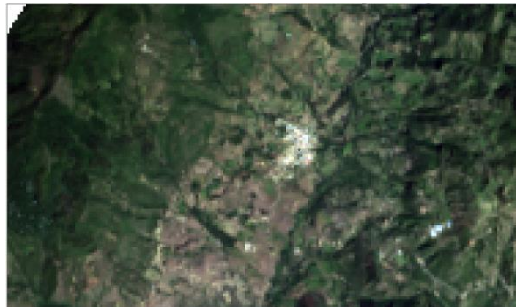
Haciendo la comparación con la clasificación, el mapa evidencia exactamente las categorías de uso de suelo utilizadas en la zona.

**Figura 17. Valle del Río Suratá, Municipio de Suratá.**



Fuente Google Earth

**Figura 18. Valle del Río Suratá, Municipio de Suratá.**



Fuente: Imagen Landsat 8. Color Real

**Figura 19. Valle del Río Suratá, Municipio de Suratá.**



Fuente Mapa de Clasificación Usos de Suelo.

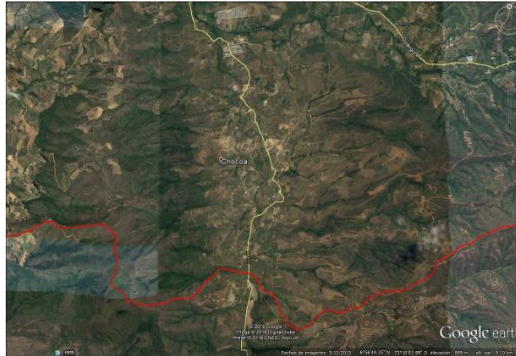
En la figuras 17, 18 y 19 se aprecia la zona del valle de Suratá, se pudo observar la combinación de cultivos con sistemas de árboles, que se definió como cultivos agroforestales, donde lo cubre una zona densa de Bosque.

#### **4.3 MAPA DE COBERTURA VEGETAL**

Para dicha validación se tomaron dos puntos sobre la zona de estudio, zona del municipio de Vetas y zona Baja del municipio de Lebrija. En cada punto se recortaron dos imágenes obtenidas de la plataforma remota Google Earth y la imagen Landsat 8 (Color Real) respectivamente y se compararon con la imagen del Mapa de Clasificación obtenido. Las Imágenes se encuentran en Escala 1:25000.



**Figura 21. Zona baja del Municipio de Lebrija.**



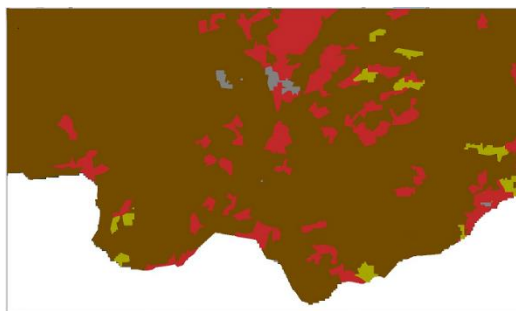
Fuente Google Earth.

**Figura 22. Zona baja del Municipio de Lebrija.**



Fuente: Imagen Landsat 8. Color Real

**Figura 23. Zona baja del Municipio de Lebrija.**



Fuente: ArcGis, clasificación Cobertura vegetal.

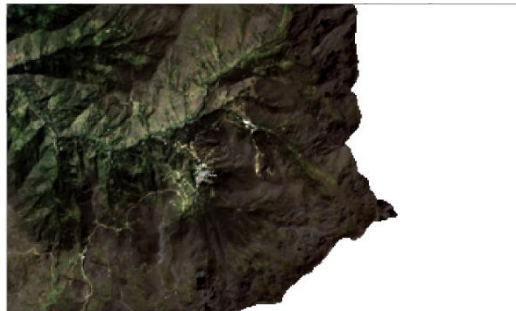
La figuras 21, 22 y 23 muestran cultivos semi intensivos – intensivos, los cuales se definieron como Cultivos en las categorías de clasificación. Comparando con los resultados, se observa que en la zona fue bien clasificado por el software.

**Figura 24. Zona del Municipio de Vetás.**



Fuente Google Earth.

**Figura 25. Zona del Municipio de Vetás.**



Fuente: Imagen Landsat 8. Color Real

**Figura 26. Zona del Municipio de Vetás.**



Fuente: ArcGis, Clasificación Cobertura Vegetal.

Las figuras 24, 25 y 26 se evidencian la zona del Páramo de Berlín, dónde se caracteriza la vegetación de páramo y ciertas áreas erosionadas por el agua.

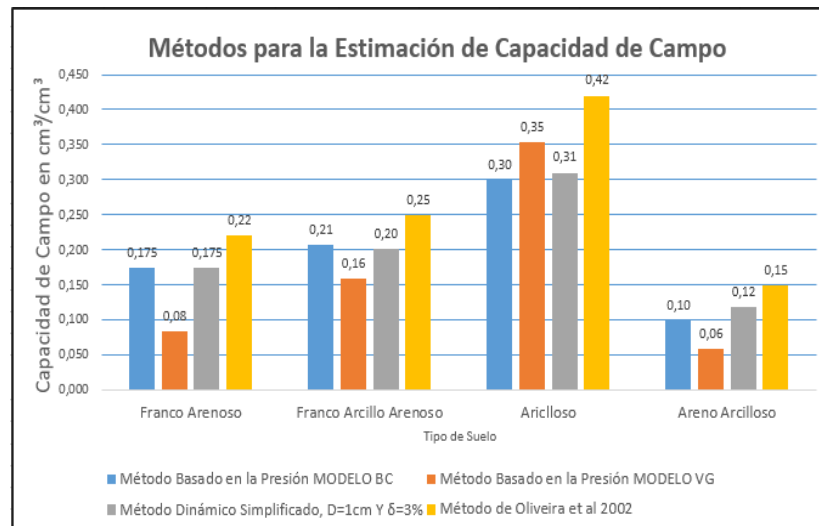
Comparando con la clasificación realizada, se observa la similitud entre las imágenes.

#### 4.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE CAPACIDAD DE CAMPO

En la figura 27 se muestran los resultados de la estimación de la capacidad de campo en  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$  por cuatro métodos diferentes, para cuatro clases texturales presentes en la CSRL.

La tabla resultados de capacidad de campo, por los métodos propuestos se observa en el (Anexo 6).

**Figura 27: Análisis comparativo de capacidad de campo. (Anexo 7)**



Con el fin de verificar la validez de los resultados obtenidos, se hizo una comparación de los cuatro métodos de estimación de capacidad de campo, con los criterios de capacidad de campo establecidos por la FAO observados en la tabla 15.

**Tabla 15. Características para humedad de cada Textura de suelo (FAO)**

Tipo de Suelo (Clasificación de la Textura del suelo en USA)	Características de Humedad del suelo
	$\Theta_{Fc}$ Capacidad de Campo
	$\Theta_{Fc}$ (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )
Franco Arenoso	0.18 - 0.28
Franco Arcillo Arenoso	0.29 - 0.37
Arcilloso	0.32 - 0.4
Areno Arcilloso	0.11 - 0.19

Fuente: ALLEN R., PEREIRA L., RAES D., SMITH M., FAO Irrigation and Drainage Paper, No 56, February 2006, pp 114. Adaptada por los autores.

En la CSRL los suelos, tienen una tendencia a ser arcillosos. Esto se observa en el triángulo de texturas debido a que la mayoría de las muestras se localizan en la zona de arcillas, tal como se muestra en la figura 10.

Estos suelos presentan un tamaño de partículas menor, lo que equivale a una gran cantidad de microporos, que les permite tener una mayor retención de agua. Estos suelos tienen una mayor succión a través de las fuerzas de adhesión y cohesión, permitiendo que el agua pase con mayor dificultad pero se retenga por más tiempo.

A su vez se aprecia las diferentes texturas con su respectivo valor de capacidad de campo en cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>. La textura franco arenosa varía entre 0.08 para el modelo vG y 0.22 para el modelo de Oliveira; el cual es un valor dentro del criterio establecido por la FAO.

La textura franco arcillo arenosa varía entre 0.16 para el modelo vG y un valor de 0.25 para el modelo de Oliveira los cuales se encuentran fuera del rango descrito

por la FAO, a su vez el suelo arcilloso varía entre los valores de 0,30 para el modelo BC y 0.42 para el modelo Oliveira; estos dos valores se encuentran fuera del rango propuesto por la FAO, pero el valor de 0.35 por el modelo vG, está en el rango.

Finalmente se observa para una textura Areno Arcillosa los valores varían entre 0.06 y 0.15, donde el modelo dinámico simplificado con un valor de 0.12 y el modelo Oliveira con 0.15 incluyen sus resultados por los propuestos por la FAO.

Con la estimación adecuada de capacidad de campo se pueden realizar modelaciones hidrológicas, estudios hidrogeológicos, determinando el agua disponible para las plantas, balances de agua en el suelo, permitiendo así una adecuada gestión de riego.

Ver Anexos de Mapas de Capacidad de Campo: Anexo 8 Método de Oliveira et al 2002, Anexo 9 Método de Brooks Corey, Anexo 10 Método Van Genuchten y Anexo 11 Método de Dinámico Simplificado.

## 5. CONCLUSIONES

Se generaron tres mapas de tipo de suelo, uso de suelo, cobertura vegetal en la Cuenca Superior del Río Lebrija en formato vectorial y raster con celdas de 30 x 30 metros, a partir de imágenes del satélite Landsat 8 OLI/TIRS ubicadas en la path/row 7/55 siguiendo la metodología de clasificación supervisada en el software ArcGIS 10.2

Estos mapas se validaron mediante supervisión visual, mapas que se pueden utilizar en los modelos hidrológicos que usen Sistemas de Información Geográfica (SIG), ya que se encuentran disponibles en formato Shape.

El tipo de suelo predominante en la CSRL es el arcilloso con un área de 504.61 Km<sup>2</sup> que equivalen al 37 % del área total de la cuenca.

Al hacer un análisis comparativo de los cuatro resultados obtenidos de estimación de la capacidad de campo se pudo concluir que el método más confiable es el modelo de Oliveira et al 2002, pues considera los datos tomados en campo, este método fue validado para suelos tropicales pues presentan un menor grado de dispersión en sus valores, generando así una mayor exactitud en sus resultados.

El método de Oliveira et al 2002 presenta un mejor comportamiento pues al comparar los cuatros resultados por los distintos métodos, incluye dos de sus clases texturales dentro de los valores establecidos por las características hidráulicas del suelo FAO con un rango de valores que oscilan entre 0,15 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> para suelos franco arenosos y de 0.42 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> para suelos arcillosos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

[1] Veihmeyer, F. J., and Hendrickson, A. H. 1931. The moisture equivalent as a measure of the field capacity of soils. *Soil Science*, 32(3), 181-193.

[2] D. Pérez, Elaboración de un modelo digital de elevaciones y generación del mapa de clasificación vegetal para la Cuenca Superior del Rio Lebrija- [Pregrado]. Universidad Industrial de Santander, 2010.

[3] B. Barrera, Estimación de la recarga en La Cuenca Superior Del Rio Lebrija mediante el balance de masa del ión cloruro. [Pregrado], Universidad Industrial de Santander, 2006.

[4] A. M, S. Gómez, Memoria explicativa de la investigación geológica e hidrogeológica en el macizo de Santander, tomo I, Bucaramanga 2007.

[5] D Hillel, D. Environmental soil physics, first edition Academic Press. San Diego U.S.A, 1998, p 771.

[6] SOIL SURVEY STAFF. (SSS) 1999. Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys. 2a. Ed.

[7] F. Suarez, Conservación de suelos, tercera edición, IICA, Costa Rica 1979.

[8] ArcGIS Resource Center. Disponible en: <http://help.arcgis.com/es/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#//009z00000076000000> [Citado: 19 octubre de 2016]

[9] Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 LDCM Disponible en: <http://www.un-spider.org/sites/default/files/LDCM-L8.R1.pdf> [15 de Octubre de 2016]

[10] Metodología Corine Land Cover: <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/metodologia-corine-land-cover>

[11] Resolución No 1432, Corporación Autónoma Regional de Santander CAS. 2010.

[12] 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.

[13] M. Castro, Y. Villacampa, estadística aplicada a la ingeniería civil, Club universitario, España 2000.

[14] A. Sierra, A. Velandia, Estimación de la Capacidad de Campo en la Cuenca Superior del Río Lebrija. [Pregrado]. Universidad Industrial de Santander, 2016.

[15] 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.

## BIBLIOGRAFIA

ArcGIS Resource Center. [en línea] [Citado: 19 octubre de 2016] Disponible en: <http://help.arcgis.com/es/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#//009z00000076000000>

BARRERA B., Estimación de la recarga en La Cuenca Superior Del Rio Lebrija mediante el balance de masa del ión cloruro. [Pregrado], Universidad Industrial de Santander, 2006.

CASTRO M., VILLACAMPA Y., estadística aplicada a la ingeniería civil, Club universitario, España 2000.

CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE SANTANDER CAS Resolución No 1432,. 2010.

GÓMEZ A. M, S., Memoria explicativa de la investigación geológica e hidrogeológica en el macizo de Santander, tomo I, Bucaramanga 2007.

HILLEL D, D. Environmental soil physics, first edition Academic Press. San Diego U.S.A, 1998, p 771.

IDEAM Metodología Corine Land Cover: [en línea] [Citado: 19 octubre de 2016] Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/metodologia-corine-land-cover>

PÉREZ D., Elaboración de un modelo digital de elevaciones y generación del mapa de clasificación vegetal para la Cuenca Superior del Rio Lebrija- [Pregrado]. Universidad Industrial de Santander, 2010.

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.

SIERRA A., VELANDIA A., Estimación de la Capacidad de Campo en la Cuenca Superior del Río Lebrija. [Pregrado]. Universidad Industrial de Santander, 2016.

SOIL SURVEY STAFF. (SSS). Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys. 2a. Ed. 1999

SPIDER Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 LDCM [en línea] [Citado: 15 octubre de 2016] Disponible en: <http://www.un-spider.org/sites/default/files/LDCM-L8.R1.pdf>

SUAREZ F., Conservación de suelos, tercera edición, IICA, Costa Rica 1979.

VEIHMEYER, F. J., and HENDRICKSON, A. H.. The moisture equivalent as a measure of the field capacity of soils. Soil Science, 32(3), 1931 181-193.

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	CÓDIGO	X	Y	TIPO	ARCILLA	LIMO	ARENA
IGAC	PS-203	1129259.677	1301629.376	franco arenoso	16.00%	24.00%	60.00%
IGAC	PS-342	1117327.805	1260950.358	franco arcillo arenoso	20.00%	18.00%	62.00%
IGAC	PS-345	1115472.931	1266722.486	arcilloso	48.00%	22.00%	30.00%
IGAC	PS-235	1132826.584	1286951.377	franco arcillo arenoso	20.00%	24.00%	56.00%
IGAC	PS-238	1126544.219	1283555.396	franco arcillo arenoso	22.00%	18.00%	60.00%
IGAC	PS-262	1134614.365	1283975.597	franco arenoso	16.00%	30.00%	54.00%
IGAC	PS-324	1108302.263	1275371.262	arcilloso	44.00%	34.00%	22.00%
IGAC	PS-306	1111651.86	1259186.639	arcilloso	50.00%	22.00%	28.00%
IGAC	PS-328	1103676.627	1286115.102	franco arcillo arenoso	26.00%	20.00%	54.00%
IGAC	PS-351	1104464.23	1276131.405	franco arenoso	14.00%	30.00%	56.00%
IGAC	PS-305	1104184.673	1262550.879	arcilloso	42.00%	14.00%	44.00%

<b>FUENTE</b>	<b>CÓDIGO</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>TIPO</b>	<b>ARCILLA</b>	<b>LIMO</b>	<b>ARENA</b>
CDMB	A-9	1100392	1271111	areno arcilloso	40.00%	10.00%	50.00%
CDMB	A-10	1099239	1272822	areno arcilloso	45.00%	5.00%	50.00%
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%

<b>FUENTE</b>	<b>CÓDIGO</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>TIPO</b>	<b>ARCILLA</b>	<b>LIMO</b>	<b>ARENA</b>
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. Metodología CORINE LAND COVER.

**Tabla 16. Clasificación de cobertura de tierras según metodología CORINE LAND COVER.**

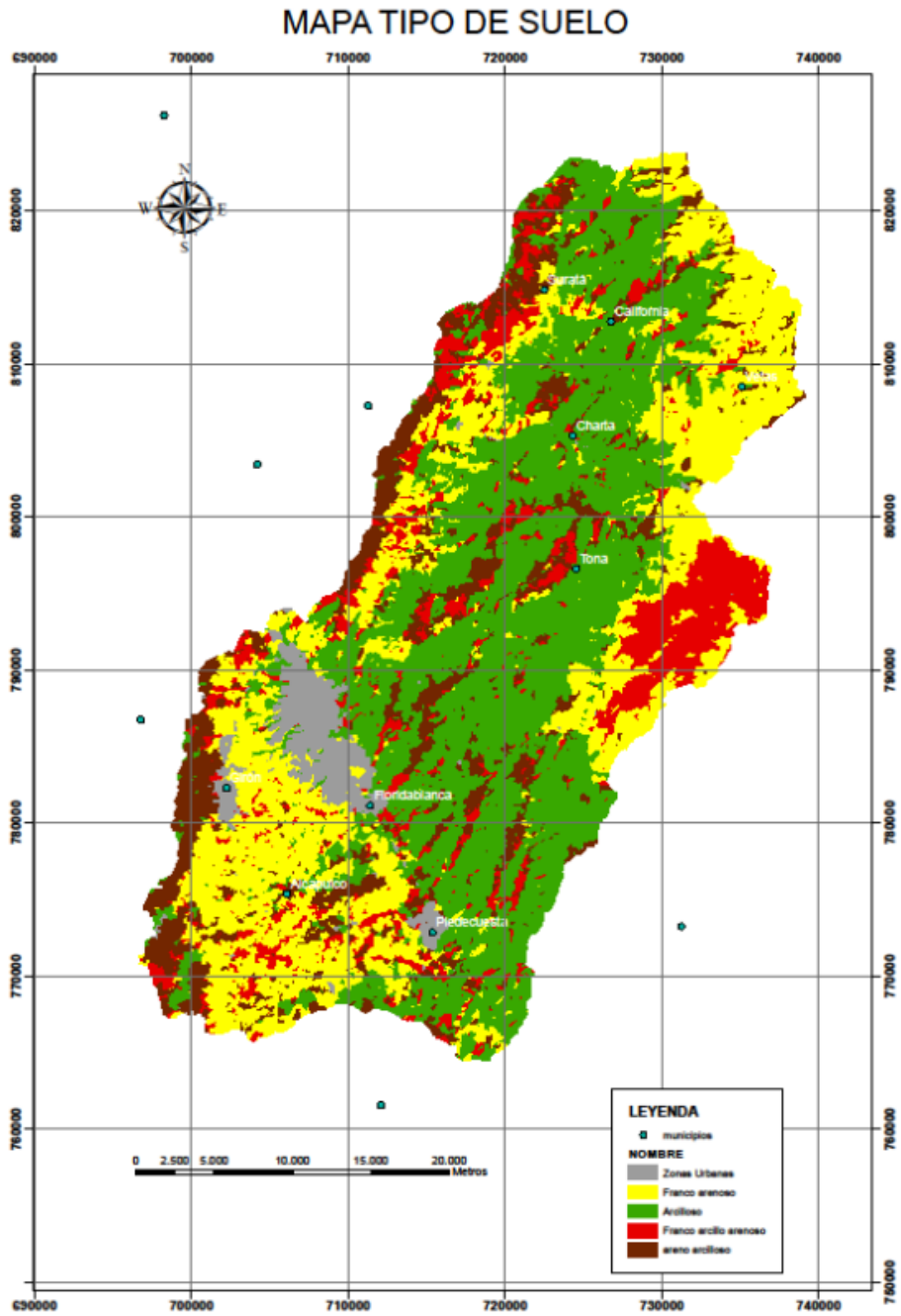
<b>1. TERRITORIOS ARTIFICIALIZADOS</b>	<b>3. BOSQUES Y ÁREAS SEMINATURALES</b>
<b>1.1. Zonas urbanizadas</b>	<b>3.1. Bosques</b>
1.1.1. Tejido urbano continuo	3.1.1. Bosque denso
1.1.2. Tejido urbano discontinuo	3.1.1.1. Bosque denso alto de tierra firme
1.2 Zonas industriales, comerciales y redes de comunicación	3.1.1.1.2. Bosque denso alto inundable
1.2.1. Zonas industriales o comerciales	3.1.1.2.1. Bosque denso bajo de tierra firme
1.2.1. Red vial, ferroviaria y terrenos asociados	3.1.1.2.2. Bosque denso bajo inundable
1.2.3. Zonas portuarias	3.1.2. Bosque abierto
1.2.4. Aeropuerto	3.1.2.1.1. Bosque abierto alto de tierra firme
1.2.5. Obras hidráulicas	3.1.2.1.2. Bosque abierto inundable
1.3 Zonas de extracción minera y escombreras	3.1.2.2.1. Bosque abierto bajo de tierra firme
1.3.1 Zonas de extracción minera	3.1.2.2.2. Bosque abierto bajo inundable
1.3.2. Zonas de disposición de residuos	3.1.3 Bosque fragmentado
1.4 Zonas verdes artificializadas, no agrícolas	3.1.4. Bosque de galería y ripario
1.4.1. Zonas verdes urbanas	3.1.5. Plantación forestal
<b>1.4.2. Instalaciones recreativas</b>	<b>3.2. Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva</b>
<b>2. TERRITORIOS AGRÍCOLAS</b>	3.2.1.1. Herbazal denso
2.1. Cultivos transitorios	3.2.1.1.1.1. Herbazal denso de tierra firme no arbolado

2.1.1 Otros cultivos transitorios	3.2.1.1.1.2. Herbazal denso de tierra firme arbolado
2.1.2 Cereales	3.2.1.1.1.3. Herbazal denso de tierra firme con arbustos
2.1.3. Oleaginosas y leguminosas	3.2.1.1.2.1. Herbazal denso inundable no arbolado
2.1.4. Hortalizas	3.2.1.1.2.2. Herbazal denso inundable arbolado
2.1.5. Tubérculos	3.2.1.1.2.3. Arracachal
<b>2.2. Cultivos permanentes</b>	3.2.1.1.2.4. Helechal
2.2.1. Cultivos permanentes herbáceos	3.2.1.2. Herbazal abierto
2.2.1.1. Otros cultivos permanentes herbáceos	3.2.1.2.1. Herbazal abierto arenoso
2.2.1.2. Caña	3.2.1.2.2. Herbazal abierto rocoso
2.2.1.3. Plátano y banano	3.2.2.1. Arbustal denso
2.2.1.4. Tabaco	3.2.2.2. Arbustal abierto
2.2.1.5. Papaya	3.2.3. Vegetación secundaria o en transición
2.2.1.6. Amapola	<b>3.3. Áreas abiertas, sin o con poca vegetación</b>
2.2.2. Cultivos permanentes arbustivos	3.3.1. Zonas arenosas naturales
2.2.2.1. Otros cultivos permanentes arbustivos	3.3.2. Afloramientos rocosos
2.2.2.2. Café	3.3.3. Tierras desnudas y degradadas
2.2.2.3. Cacao	3.3.4. Zonas quemadas
2.2.2.4. Viñedos	3.3.5. Zonas glaciares y nivales
2.2.2.5. Coca	<b>4. ÁREAS HÚMEDAS</b>
2.2.3. Cultivos arbóreos	<b>4.1. Áreas húmedas continentales</b>
2.2.3.1. Otros cultivos permanente arbóreos	4.1.1. Zonas pantanosas
2.2.3.2. Palma de aceite	4.1.2. Turberas
2.2.3.3. Cítricos	4.1.3. vegetación acuática sobre cuerpos de agua
2.2.3.4. Mango	<b>4.2. Áreas húmedas costeras</b>
2.2.4. Cultivos agroforestales	4.2.1. Pantanos costeros

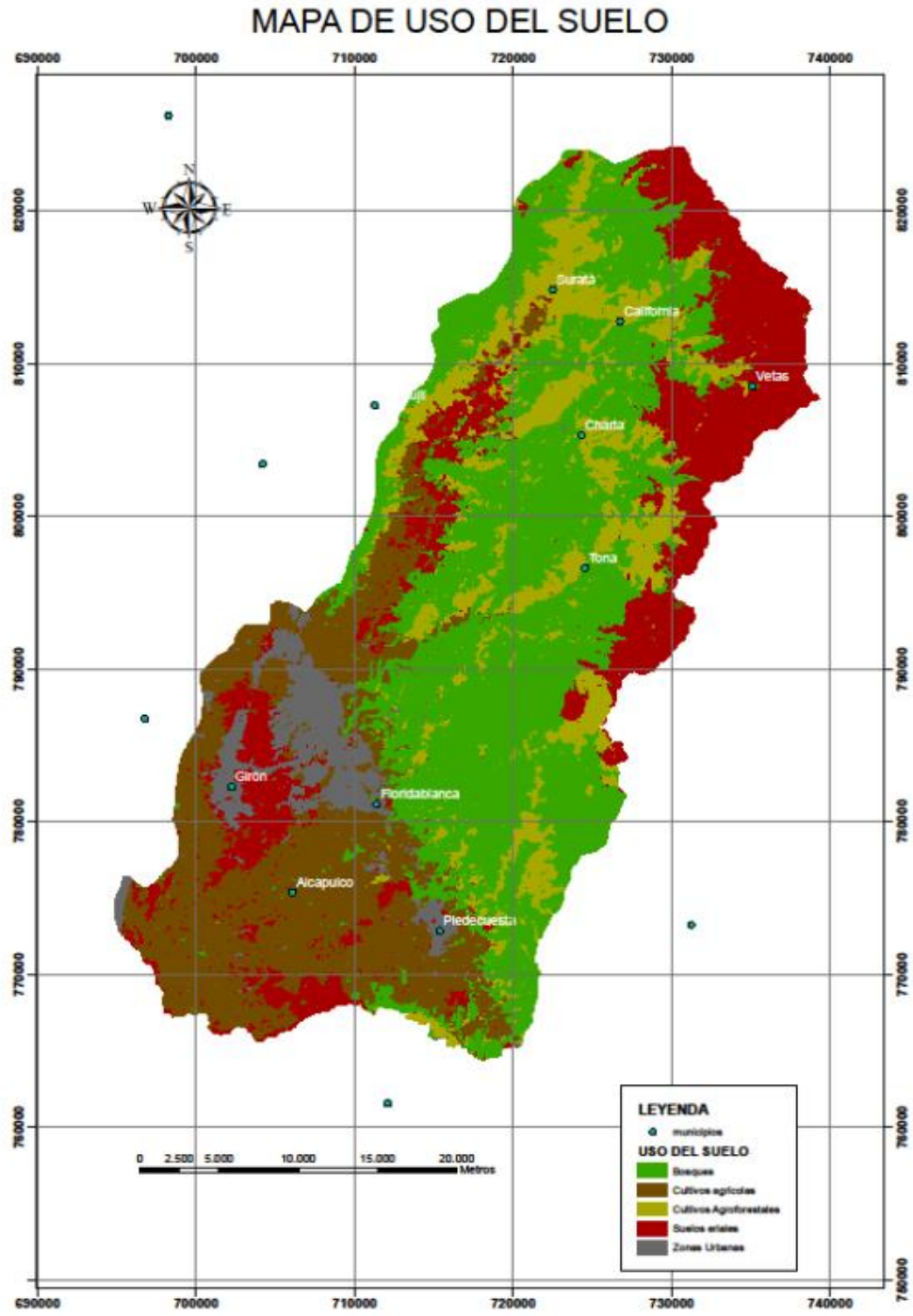
2.2.5. Cultivos confinados	4.2.2 Salitral
<b>2.3. Pastos</b>	4.2.3. Sedimentos expuestos en baja mar
2.3.1. Pastos limpios	<b>5. SUPERFICIES DE AGUA</b>
2.3.2. Pastos arbolados	<b>5.1. Aguas continentales</b>
2.3.3. Pastos enmalezados	5.1.1. Ríos (50m)
<b>2.4. Áreas agrícolas heterogéneas</b>	5.1.2. Lagunas, lagos y ciénagas naturales
2.4.1. Mosaico de cultivos	5.1.3. Canales
2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos	5.1.4. Cuerpos de agua artificiales
2.4.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	<b>5.2 Aguas marítimas</b>
2.4.4. Mosaico de pastos con espacios naturales	5.2.1. Lagunas costeras
2.4.5. Mosaico de cultivos y espacios naturales	5.2.2. Mares y océanos
	5.2.3. Estanques para acuicultura marina

Fuente. IDEAM 2010. Metodología de clasificación de coberturas de tierras según Corine Land Cover, adaptada para Colombia.

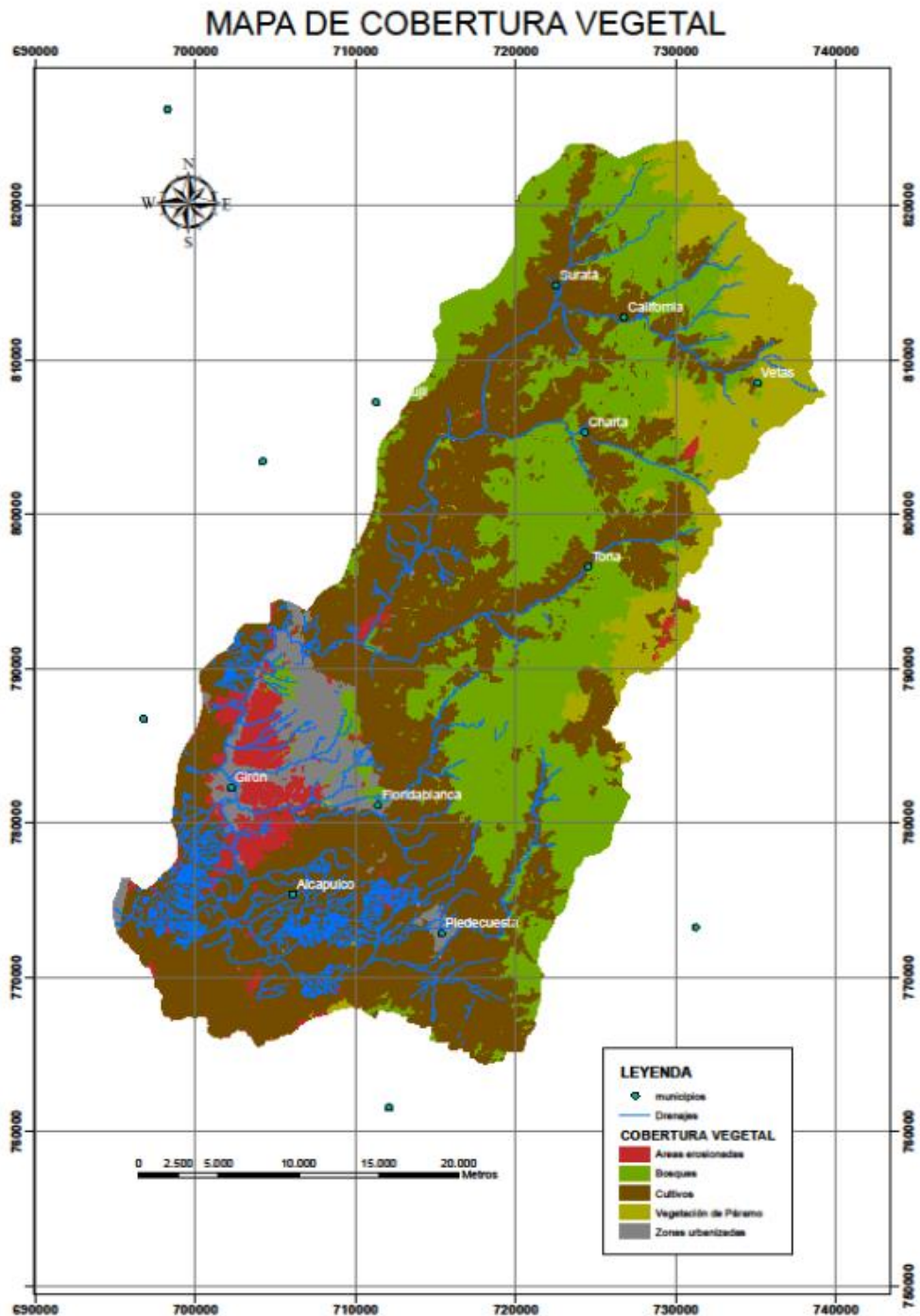
### Anexo C. Mapa de tipo de suelo de la CSRL.



## Anexo D. Mapa de uso de suelo de la CSRL



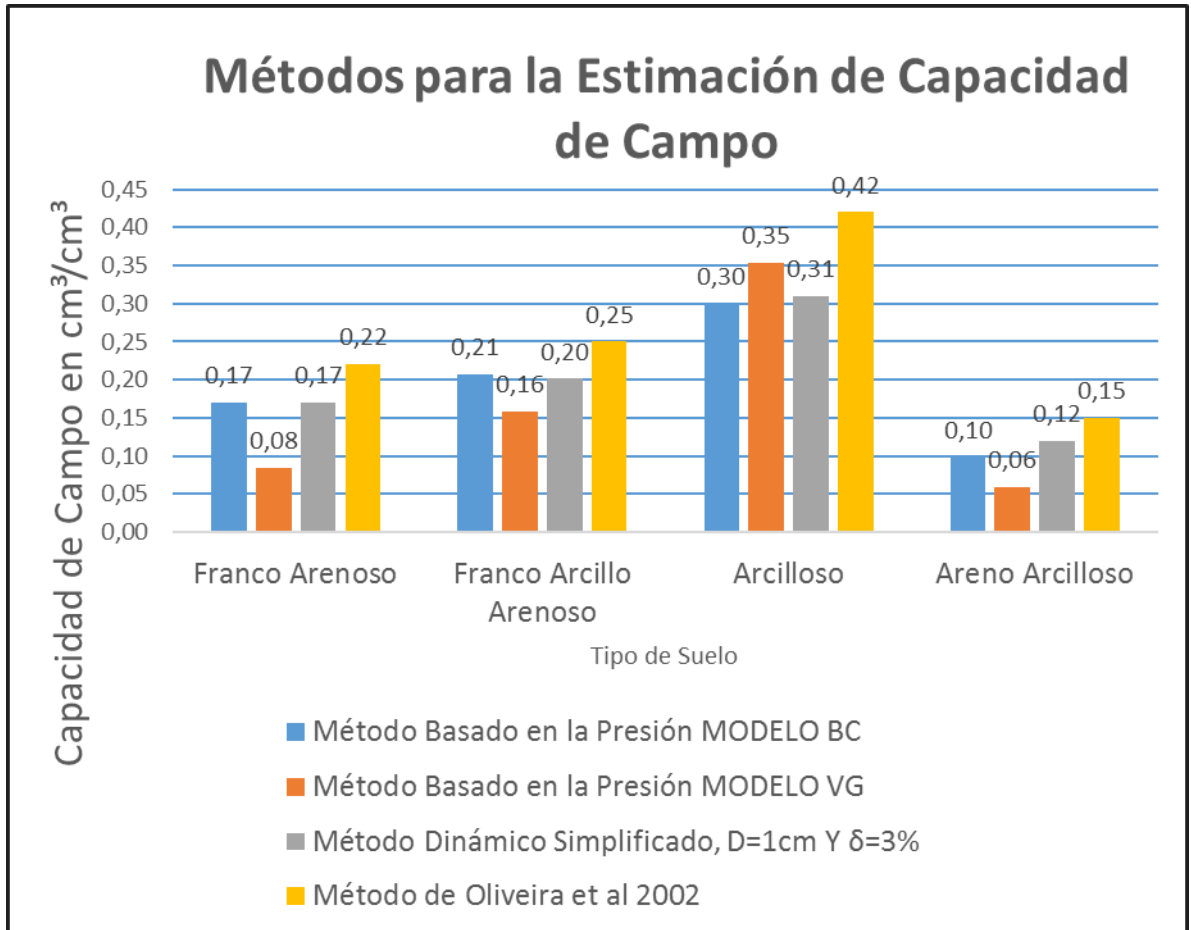
## Anexo E. Mapa de Cobertura Vegetal de la CSRL



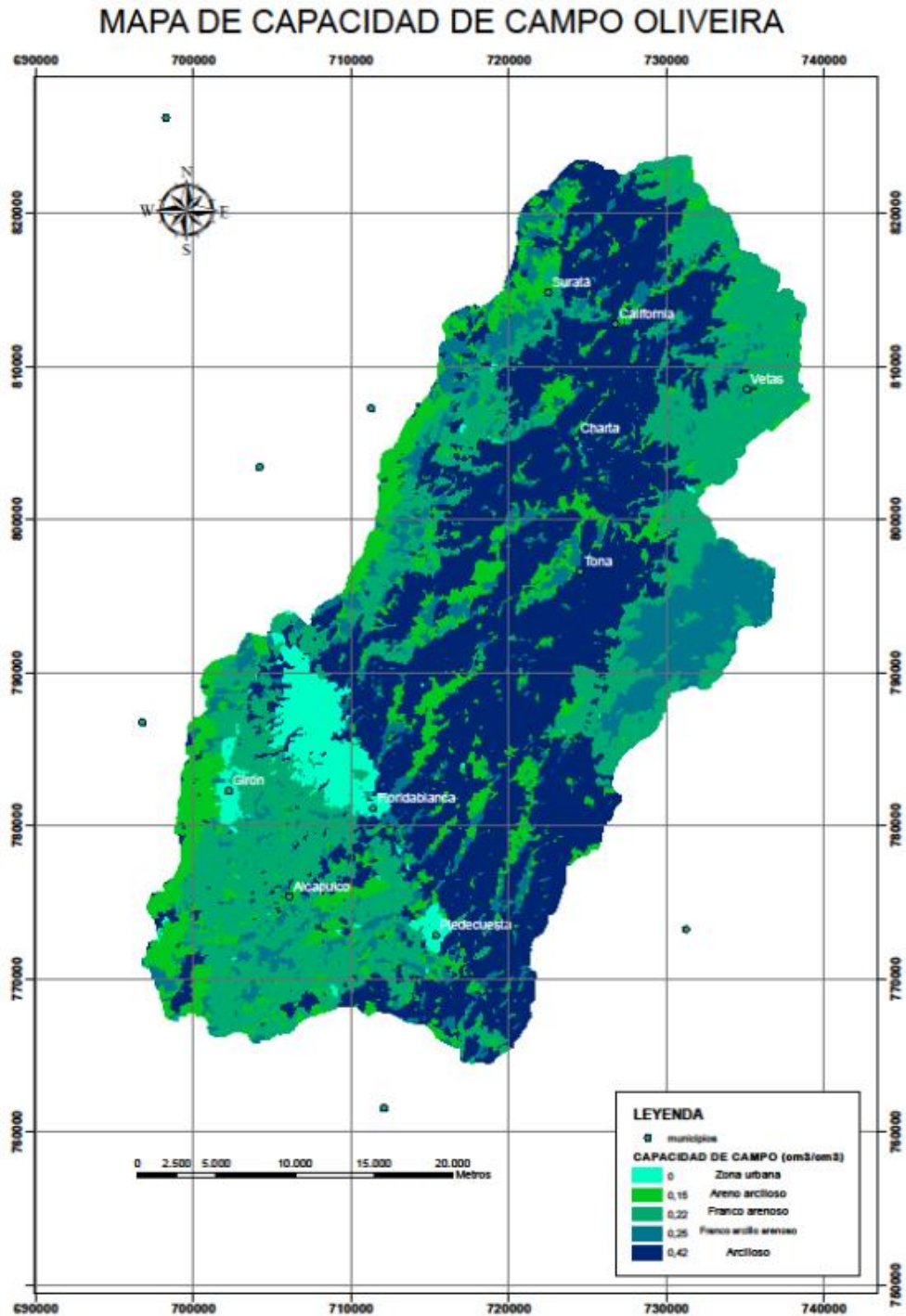
**Anexo F. Tabla resultados de capacidad de campo, por los métodos propuestos.**

Tipo de Suelo	Método Basado en la Presión MODELO BC	Método Basado en la Presión MODELO VG	Método Dinámico Simplificado, D=1cm Y $\delta=3\%$	Método de Oliveira et al 2002
Franco Arenoso	0,17	0,08	0,17	0,22
Franco Arcillo Arenoso	0,21	0,16	0,20	0,25
Arcilloso	0,30	0,35	0,31	0,42
Areno Arcilloso	0,10	0,06	0,12	0,15

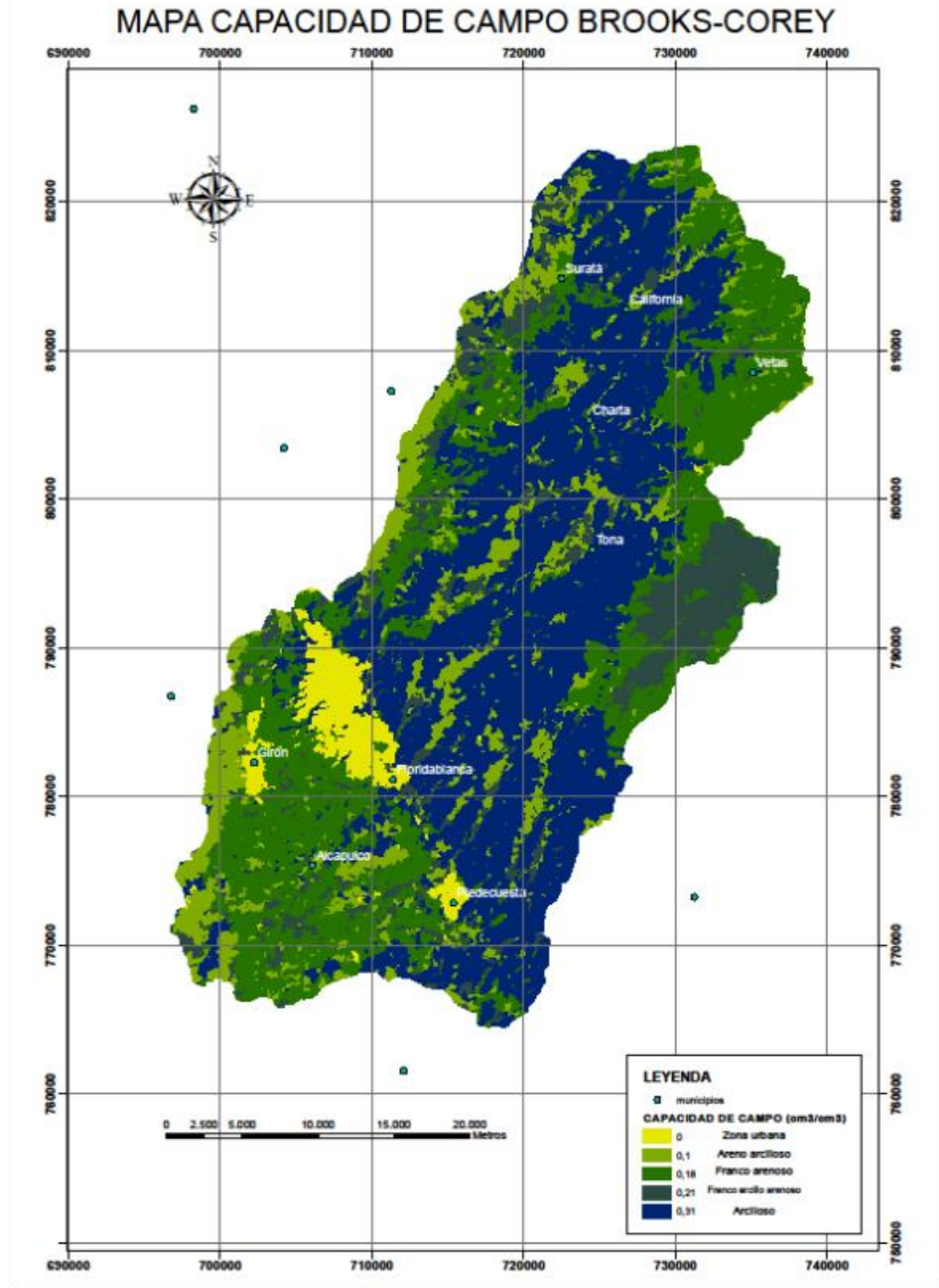
### Anexo G. Análisis comparativo de capacidad de campo.



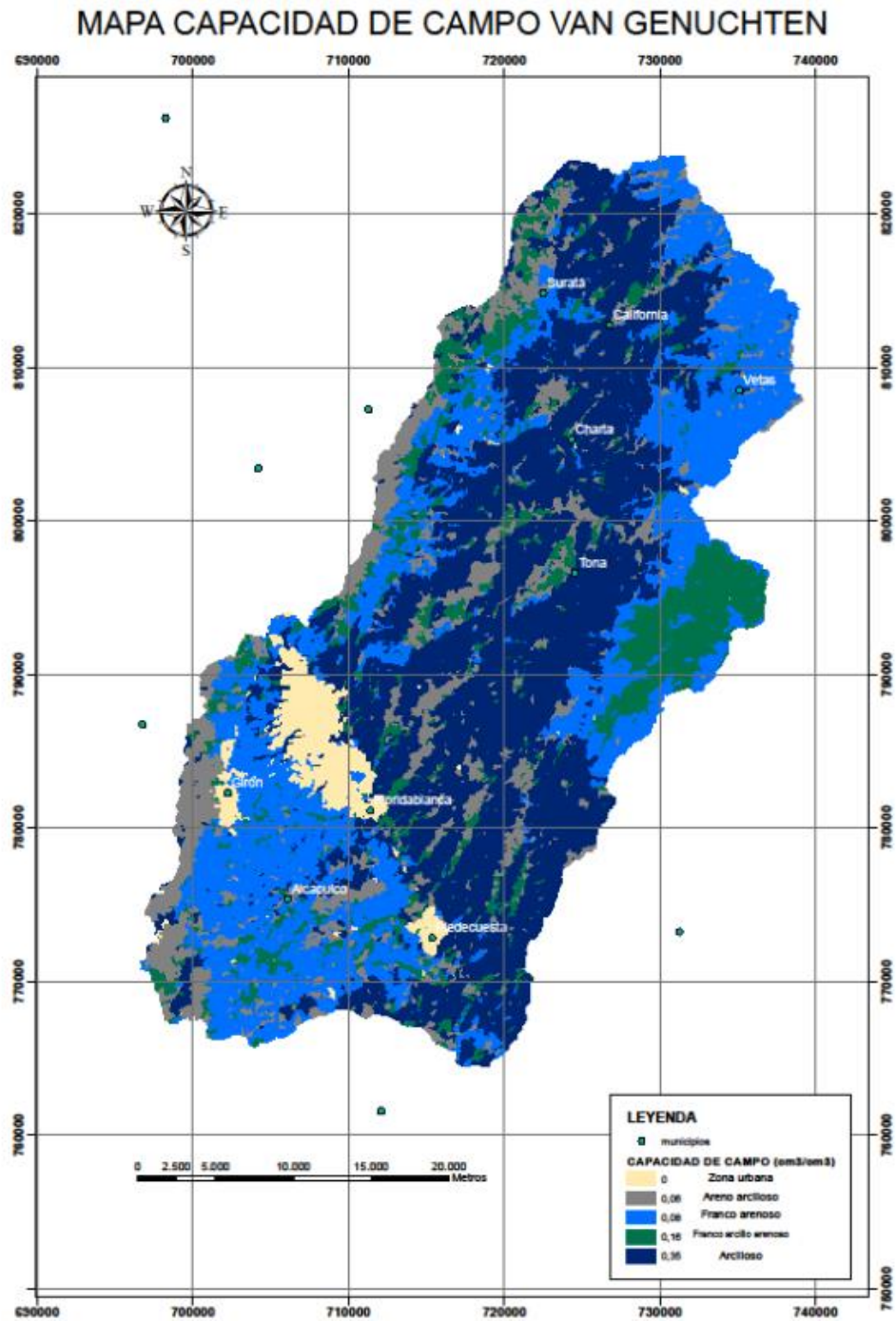
Anexo H. Mapa de Capacidad de Campo por el Método de Oliveira et al 2002.



Anexo I. Mapa de Capacidad de Campo por el Método de Brooks Corey.



## Anexo J. Mapa de Capacidad de Campo por el Método de Van Genuchten.



## Anexo K. Mapa de Capacidad de Campo por el Método de Dinámico Simplificado.

### MAPA CAPACIDAD DE CAMPO DINAMICO SIMPLIFICADO

