



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS
DEL SUELO, Y SU RELACIÓN CON DIFERENTES VARIABLES
AMBIENTALES EN LOS BOSQUES DE *Pinus hartwegii* Y *Abies religiosa*,
EN LA CUENCA DEL RÍO MAGDALENA, D.F.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIADO EN GEOGRAFÍA

P R E S E N T A :

JOSÉ DAVID LEÓN GUTIÉRREZ

MEXICO, D.F. 2011



DIRECTOR: DR. JOSÉ ANTONIO BENJAMÍN ORDOÑEZ DÍAZ



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES

FORMA 3
APROBACIÓN DEL TRABAJO ESCRITO POR EL SÍNODO

EGRESADO: LEÓN GUTIÉRREZ JOSÉ DAVID
Nº de cuenta: 099167592
Generación: 2003-2008
PRESENTE

Por este conducto tenemos a bien comunicar a Usted que, después de revisar el trabajo escrito de **TESIS** titulado "**DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DEL SUELO, Y SU RELACIÓN CON DIFERENTES VARIABLES AMBIENTALES EN LOS BOSQUES DE PINUS HARTWEGII Y ABIES RELIGIOSA, EN LA CUENCA DEL RÍO MAGDALENA, DISTRITO FEDERAL.**", para optar por el grado de **LICENCIADO** en GEOGRAFÍA, cada uno de los miembros del jurado emitió su dictamen aprobatorio considerando que dicho trabajo reúne los requisitos académicos necesarios para presentar el examen oral correspondiente.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria, D.F. a 10 de marzo de 2011.

NOMBRE DE SINODALES	ANTIGÜEDAD EN LA UNAM	FIRMA DE APROBACIÓN DEL TRABAJO ESCRITO
Presidente: <u>MTRO. JOSÉ MANUEL ESPINOZA RODRÍGUEZ</u>	<u>27-X-86</u>	
Vocal: <u>LIC. CLAUDIA VALLEJO ALBARRÁN</u>	<u>01-V-91</u>	
Secretario: A.T. <u>DR. JOSÉ ANTONIO ORDÓÑEZ DÍAZ</u>	<u>01-VIII-06</u>	
Suplente: <u>DRA. LETICIA GÓMEZ MENDOZA</u>	<u>17-VI-01</u>	
Suplente: <u>MTRO. MANUEL HERNÁNDEZ QUIROZ</u>	<u>01-I-04</u>	

Vo. Bo.

COORDINADORA DE LA CARRERA

DRA. PATRICIA GÓMEZ REY

Dedicatoria

A mi Padre Alfredo León Cruz†, por todo lo que me enseñaste y me has enseñado a pesar de tu partida, por el ejemplo de vida que representas para mí, y porque me hubiera encantado que compartiéramos este logro juntos.

A José Blancas González†, por ser la mejor persona que he conocido en mi vida, siempre voy a recordar todas aquellas platicas que tuvimos, y porque gracias a ti soy un mejor individuo.

A mi Madre Guadalupe Gutiérrez García, porque eres la persona más importante, gracias por todo lo que me has enseñado sobre la vida, por tu paciencia, y sobre todo por darme la vida, Te amo.

A Cristina León† y Florencia León†, por la motivación que representaron para la realización de mi carrera universitaria.

A la Familia Báez Garnier: Azayen gracias por ser como una hermana, por cuidarme y preocuparte, por tu apoyo y compañía a lo largo de mi vida.

A la Familia Martínez Rangel, Alfonso, Abigail, Luis A. y Hugo, por ser mi segunda familia, por ayudarme a lo largo de toda mi vida, por su compañía, su motivación, su amistad y porque definitivamente son y serán siempre una parte muy importante de mi vida, Gracias!!!

A mis tías Teresa León, Laura, Claudia y Teresa Gutiérrez por todo el apoyo durante la etapa más difícil de mi vida. A mi Tío Toño (Eusebio), por ser mi amigo y por escucharme cada vez que te necesito.

A mis amigos Oliver López, Alejandro Barragán, Horacio Cruz y Eder González por, lo que hemos compartido a lo largo de los años, y por brindarme su amistad a pesar de todo.

A Mauricio Galeana, mi amigo con el que compartí todas las experiencias (buenas y malas) a lo largo de la carrera, por ser parte fundamental de mi formación y malformación, por hacer más amena mi estancia en las aulas y por todas aquellas platicas sobre música y fútbol.

Citlalli Tapia para ti no tengo palabras con las cuales expresar mi agradecimiento, fuiste una motivación muy importante para la culminación de éste trabajo, gracias por todo el tiempo y experiencias que has compartido conmigo, pero sobre todo por siempre animarme, por la confianza que tienes en mí y por tu invaluable ayuda para la mejora de mi trabajo, te quiero mucho M8M.

A Horacio Carranza, porque eres la onda duende!, gracias hermano.

A Gaby Aguirre, por tu amistad incondicional a lo largo de todos estos años, y porque siempre me has animado con tu singular alegría.

Agradecimientos

Al Dr. José Antonio Benjamín Ordóñez Díaz (Toño) por ser mi amigo, gracias por tu apoyo incondicional, tu paciencia, consejos y tu confianza en mí para culminar esta tesis después de tanto tiempo, sin tu ayuda no hubiera llegado a la meta, gracias!

Al Mtro. Manuel Hernández Quiroz (Capi) por tu valiosa amistad a lo largo de estos años, tu apoyo en todos los aspectos de mi vida y por la confianza que tienes en mí. También por tu ayuda en los análisis de laboratorio y en la revisión de mi trabajo.

A la Biol. Claudia Vallejo, por tus sinceros y acertados comentarios, que me hicieron ver aspectos que desconocía sobre mi propio trabajo, además del tiempo que dedicaste para su revisión. Gracias por ser la persona que me motivó a conocer más sobre el mundo de los suelos.

A la Dra. Leticia Gómez Mendoza y al Mtro. José Manuel Espinoza Rodríguez, por sus comentarios y acotaciones para mejorar el presente trabajo, así como el tiempo invertido en su revisión y su buena disposición en cada una de nuestras reuniones.

A la Unidad de Análisis Ambiental (UNAAMB), por ser mi segunda casa y permitirme realizar las pruebas de laboratorio de mi trabajo. A la Dra. Claudia Ponce de León Hill y la Dra. Cecilia Vanegas Pérez por brindarme su confianza y amistad, además de abrirme las puertas de la UNAAMB y darme una oportunidad laboral importantísima en mi formación profesional.

A la Biol. Fabiola Rodríguez (Faby), gracias por todos los momentos que pasamos juntos, tu apoyo incondicional y por escucharme siempre.

A mis compañeros de la UNAAMB Fabiola Murguía, Víctor Alcántara, Luz Piña, Raquel Sánchez, Ramsés García, Paulina Guerrero, Cecilia Robles, Sebastián Zúñiga, Efrén Astorga, Jesús Hernández, Roberto Huerta, Pamela García y Patricia Hernández por todos los momentos que pasamos juntos dentro y fuera del laboratorio.

Al Geog. Mauricio Galeana Pizaña, porque sin ti nada de esto hubiera sido posible, por tu ayuda y compañía en el trabajo de campo, por escucharme cada vez que me sentí frustrado, porque siempre estuviste ahí cuando te necesité...en fin Gracias!!!

Al Biol. Juan Briones, por ser la primer persona que me brindó su amistad cuando llegué a la F. de Ciencias, por todo tu apoyo, por tus enseñanzas de botánica, tu compañía en campo y en el laboratorio, gracias amigo!.

A la Geog. Gabriela Aguirre por todas las veces que me acompañaste al campo, tus comentarios sobre mi trabajo, tus consejos, por siempre animarme y recordarme la importancia de concluir esta etapa de mi vida.

Al Biol. Guillermo Martínez, por tu amistad y los valiosos comentarios y revisiones que hiciste de mi documento, así como tu importante ayuda en el trabajo de campo.

A la Biol. Nirani Corona, gracias por tu amistad a pesar de todo lo que hemos pasado, por tus consejos, tu ayuda, tu compañía, por todas las pláticas tan amenas y por tu confianza en mí.

A mis amigos y compañeros que participaron en campo: Gerardo Pantoja, Daniel Olvera, Martha Quintana, Fiorella Ortiz, Carlos Dobler, Elsa Elizalde, Alejandra Guzmán, Víctor Ávila, Miriam Rubio, Yedith García, Yuriana Martínez, Irene Sandoval, Javier Nava, Karla Comparán, Janette Rivera, Paula Hernández, Zuelclady Araujo, Felipe Arreola y Lucía Almeida.

Al Instituto de Geología, gracias a la Dra. Lucy Mora y a la Mtra. Kumiko Shimada por el apoyo en los análisis de mis muestras.

Al Laboratorio de Ecosistemas de Montaña de la Facultad de Ciencias, por el apoyo y financiamiento parcial de mi trabajo, a la Dra. Lucia Almeida, al Dr. Jorge Gama y al Dr. Víctor Ávila-Akerberg por sus comentarios y ayuda en la definición de varios aspectos de esta tesis.

A mis amigos del CentroGeo: Miguel A. Toriz, Jairzinho López, Talib Oliver, Alfonso Tapia y Patricia López por todo su apoyo y por las porras para la finalización de éste trabajo. Adrián Palma gracias por ser mi brother, por tu importante apoyo y por tus valiosos consejos.

Al Geog. Juan Aguirre, por tu amistad y por todas las cosas que me enseñaste, además de ser determinante en el camino profesional que he tomado.

A todos mis compañeros y amigos de la carrera, pero en especial: Abigail Reyes, Ana Rosales, Moisés Zamora, Brenda Ontiveros, Mariana Sierra, Lizbeth Camacho, Christian Santillanes y Efraín Damián, gracias por todos los momentos que compartimos y porque sin ustedes mi paso por las aulas no hubiera sido tan divertido.

Al Dr. Genaro Correa, por ser la primera persona del colegio de Geografía que confió en mí, por brindarme la oportunidad de acercarme y descubrir una de mis pasiones: la enseñanza.

A PRONATURA A.C. y al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias por las facilidades otorgadas durante el desarrollo de mi tesis.

Este estudio fue financiado por el Proyecto UNAM:20993-1498-5-XI-07; INE: INE/A1-055/2007, "Comportamiento y distribución de la Plagas de importancia económica en el sector forestal ante un cambio climático en México; financiamiento en parte por Macroproyecto: Manejo de Ecosistemas y Desarrollo Humano, Universidad Nacional Autónoma de México y fondos propios.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	12
I. MARCO TEÓRICO	14
1. Suelo	14
1.1 Epipedón	15
1.2 Propiedades del suelo	16
1.2.1 Propiedades físicas	16
1.2.2 Propiedades químicas	18
2. Geoestadística	26
2.1 Interpolación espacial	26
2.2. Kriging	26
2.3. Kriging Ordinario	26
2.3.1. Análisis exploratorio estadístico	27
2.3.2. Modelación del variograma	28
2.3.2.1 Análisis de Anisotropía	28
2.3.2.2 Búsqueda de Vecindad	29
2.3.2.3 Validación Cruzada	29
II. OBJETIVOS	30
III. ÁREA DE ESTUDIO	31
3.1 Características del medio físico	31
3.2 Geología	31
3.3 Clima	34
3.4 Hidrología	36
3.5 Vegetación	36
3.6 Suelos	39
IV. MATERIALES Y MÉTODOS	41
4.1 Diseño del Muestreo	41
4.2 Unidad de Muestreo	41
4.4.1 Análisis Físicos	43
4.4.2 Análisis Químicos	44
4.5 Cartografía	45
4.5.1 Análisis exploratorio estadístico	45
4.5.2 Modelación del Semivariograma	46

4.5.3 Búsqueda de Vecindad.....	47
4.5.4 Validación Cruzada	47
4.6 Análisis Estadístico	48
V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	49
5.1 Análisis Geoestadístico	49
5.2 Propiedades Físicas	50
5.3 Propiedades Químicas	65
5.4 Correlaciones entre las propiedades del suelo.....	90
VI. CONCLUSIONES	92
ANEXOS.....	106

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1.- Proporción ideal del sistema del suelo.	14
2.- Diferencias entre densidad real (a) y densidad de partícula (b).	16
3.- Funciones atribuidas a la MOS, las flechas grises indican las interacciones que pueden ocurrir entre las clases de funciones.	22
4.- Modelo de un semivariograma típico.	27
5.- Mapa de ubicación de la cuenca del Río Magdalena en el D.F.	31
6.- Mapa de la cuenca del Río Magdalena.	32
7.- Temperaturas medias mensuales de nueve estaciones meteorológicas cercanas a la cuenca del río Magdalena, D.F.	33
8.- Precipitación media mensual de nueve estaciones meteorológicas cercanas a la cuenca del río Magdalena, D.F.	34
9.- Mapa de vegetación de la cuenca del río Magdalena.	37
10.- Sitios de muestreo y clases altitudinales en la CRM.	40
11.- Diseño de muestreo anidado para cada sitio	41
12.- Ejemplo del histograma de frecuencias y estadísticos básicos de los datos de pH (H ₂ O).	44
13.- Ejemplo de la modelación del semivariograma para los datos de pH(H ₂ O)	45
14.- Ejemplo de la búsqueda de vecindad para los datos de pH (H ₂ O).	46
15.- Ejemplo de la validación cruzada para los datos de pH (H ₂ O).	46
16.- Mapa de porcentaje de arenas del horizonte superficial en la cuenca del río Magdalena.	53
17.- Mapa de porcentaje de limos del horizonte superficial en la cuenca del río Magdalena.	54
18.- Mapa de porcentaje de arcillas del horizonte superficial en la cuenca del río Magdalena.	55
19.- Mapa de densidad real del horizonte superficial en la cuenca del río Magdalena.	58
20.- Mapa de densidad aparente del horizonte superficial en la cuenca del río Magdalena.	59
21.- Mapa de porcentaje de humedad del horizonte superficial en la cuenca del río Magdalena.	62
22.- Histograma de frecuencias de los colores observados en el área de estudio.	63
23.- Mapa de pH del horizonte superficial en la cuenca del río Magdalena.	66

24.- Mapa de conductividad eléctrica del horizonte superficial en la cuenca del río Magdalena.	69
25.- Mapa de Fósforo disponible del horizonte superficial en la cuenca del río Magdalena.	71
26.- Mapa del porcentaje de materia orgánica del horizonte superficial en la cuenca del río Magdalena.	74
27.- Mapa del porcentaje de Carbono orgánico del horizonte superficial en la cuenca del río Magdalena.	77
28.- Mapa del porcentaje de Nitrógeno del horizonte superficial en la cuenca del río Magdalena.	80
29.- Mapa de la capacidad de intercambio catiónico del horizonte superficial en la cuenca del río Magdalena.	84
30.- Mapa del Sodio intercambiable del horizonte superficial en la cuenca del río Magdalena.	85
31.- Mapa del Potasio intercambiable del horizonte superficial en la cuenca del río Magdalena.	86
32.- Mapa del Calcio intercambiable del horizonte superficial en la cuenca del río Magdalena.	87
33.- Mapa del Magnesio intercambiable del horizonte superficial en la cuenca del río Magdalena.	88

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Página
1.- Algunas características de los separados del suelo sobre la base del diámetro de partículas esféricas y densidad real =2.85	15
2.- Intervalos y efectos de pH establecidos por la USDA.	18
3.- Valores y efectos de la conductividad eléctrica en la solución del suelo	19
4.- Clasificación para el fósforo disponible por el método de Bray-1 para suelos ácidos.	20
5.- Valores para la capacidad de intercambio catiónico de un suelo.	20
6.- Niveles de cationes intercambiables en cmol/Kg.	21
7.- Clasificación del carbono y materia orgánica en suelos derivados de cenizas volcánicas.	21
8.- Valores en porcentaje de Nitrógeno total en el suelo.	24
9.- Relación carbono/nitrógeno.	24
10.- Áreas de las clases de la cobertura vegetal y uso de suelo en la Cuenca del Río Magdalena.	36
11.- Análisis espacial para variables edáficas, tipo de modelo y parámetros de los semivariogramas.	48
12.- Promedios de textura y las diferentes fracciones con su error estándar para cada una de las variables ambientales.	50
13.- Promedios de la densidad real y aparente con su error estándar para cada una de las variables ambientales.	56
14.- Promedios del porcentaje de porosidad con su error estándar para cada una de las variables ambientales.	60
15.- Promedios del porcentaje de humedad con su error estándar para cada una de las variables ambientales.	61
16.- Promedios del pH en H ₂ O y KCl con su error estándar para cada una de las variables ambientales.	64
17.- Promedios del contenido de Nitrógeno total con su error estándar para cada una de las variables ambientales.	67
18.- Promedios del fósforo disponible con su error estándar para cada una de las variables ambientales.	70
19.- Promedios del porcentaje de materia orgánica con su error estándar para cada una de las variables ambientales.	73
20.- Promedios del porcentaje de carbono orgánico total con su error estándar para cada una de las variables ambientales.	76
21.- Promedios del contenido de Nitrógeno total con su error estándar para cada una de las variables ambientales.	78

22.- Promedios de la relación C/N con su error estándar para cada una de las variables ambientales.	81
23.- Promedios de la CIC y los cationes intercambiables con su error estándar para cada una de las variables ambientales.	82
24.- Coeficientes de correlación (r) para las relaciones entre las diferentes variables ambientales y propiedades fisicoquímicas de los sitios de estudio (n=51).	90

INTRODUCCIÓN

La Cuenca del Río Magdalena

La cuenca del Río Magdalena (CRM) ha sido utilizada para diversos fines como son: el establecimiento de poblados, de obrajes, de molinos, de batanes y de dinamos, estos últimos, para la producción de electricidad usada por las fábricas de papel, hilados y tejidos, hace varias décadas. También fue explotada por la empresa Loreto y Peña Pobre, durante el periodo de 1947 a 1982, en el que acorde con Fernández *et al* (2002), se registra la tala más importante, calculando una pérdida de alrededor de 40% de su cobertura.

Otro problema que enfrenta es en cuanto a la normatividad que define dicha área. Así, la Cañada de los Dinamos cuenta con un acuerdo y un decreto; el primero corresponde a la declaratoria de Zona Protectora Forestal los Bosques de la Cañada de Contreras, D.F. del 27 de junio de 1932, en el cual se establece una superficie de 3,100 ha, correspondientes a terrenos forestales de la Hacienda de la Cañada y del Pueblo de la Magdalena. El segundo, es un decreto presidencial a favor de la creación de la Unidad Industrial de Explotación Forestal para la fábrica de papel Loreto y Peña Pobre que declara la Zona de Protección Forestal del río Magdalena de fecha 19 de mayo de 1947. Dicha región abarca una faja de doce kilómetros de longitud desde el nacimiento del río hacia aguas abajo con una anchura de 500 metros a cada lado del cauce (Fernández *et al*, 2002).

Por otra parte, el Programa General de Ordenamiento Ecológico del Distrito Federal, publicado oficialmente en el año 2000, contradice al acuerdo y el decreto ya que establece como área natural protegida una superficie de 215 ha con categoría de zona protectora forestal. Además de las contradicciones jurídicas, el área natural protegida del río Magdalena presenta un traslape importante con una presunta propiedad privada, el predio La Cañada de 111.8 ha. Allí existe un uso indiscriminado del predio por parte de comerciantes y paseantes, además de una fuerte presión de los asentamientos humanos irregulares de San Nicolás Totolapan (Cazulco) y Magdalena Contreras (Ladera de Sayula) que, de forma acelerada y desordenada, han ganado terreno a las zonas forestales en áreas de alto riesgo (Fernández *et al.*, 2002).

Justificación

Las zonas volcánicas son de gran importancia en nuestro país. Debido a su amplia extensión y fertilidad han sido sometidas a una intensa explotación desde mucho tiempo atrás. Coincidentemente, en estas zonas es donde se concentra el grueso de la población del país; por lo que, están sometidas a una fuerte presión, que provoca un importante deterioro en los ecosistemas.

De todos los problemas de deterioro del medio ambiente, la degradación del suelo es uno de los más importantes, porque constituye el sustento de otros componentes del ecosistema (Ríos, 2006). En él se llevan a cabo partes esenciales de los ciclos del carbono, del nitrógeno, del fósforo y del azufre (Porta *et al*, 2003). La importancia de proteger un suelo determinado radica en que es un recurso no renovable en la escala de tiempo humano. Para que un suelo se regenere a su estructura original se pueden requerir muchos años. Generalmente, la cantidad de suelo que se forma sólo es de algunos milímetros por año (Brady y Weil, 1996).

La cuenca del río Magdalena es un caso interesante debido a que se encuentra en el Distrito Federal el cual es una de las áreas urbanas más grandes del mundo y los componentes de su ecosistema (incluido el suelo) brindan una serie de servicios ecosistémicos (Ávila-Akerberg, 2002), que se comenta a continuación:

- ▶ Contribuye a la retención de suelos de esta cuenca, evitando su erosión.
- ▶ Funciona como “amortiguador ecológico”, por la captación de algunos gases contaminantes como dióxido de carbono.
- ▶ Es área de recreación y esparcimiento en la que se desarrollan actividades de escalamiento, renta de caballos, deporte al aire libre, entre otras.
- ▶ Proporciona sustento económico a muchas familias, mediante el aprovechamiento de productos no maderables y el turismo.

El horizonte superficial (epipedón) constituye la parte más importante del suelo para la producción de vegetación, manejo y control de la degradación del suelo, lo cual le atribuye una importancia ecológica dentro de un ecosistema; además es la capa más superficial y, por tanto, la más variable a través del tiempo y el espacio, a diferencia de las capas inferiores, las cuales permanecen relativamente estables a lo largo del tiempo (Spaargaren *et al*, 1998).

El estado de las propiedades del suelo, refleja el nivel de degradación de varios componentes que conforman al ecosistema; por ello es importante conocer el estado actual del suelo superficial dentro de la cuenca y las interacciones que éste tiene con el espacio geográfico (vegetación y relieve), para poder identificar problemas relacionados con el suelo, como erosión, compactación y baja productividad, así como resaltar la importancia de su conservación.

I.MARCO TEÓRICO

1. Suelo

El suelo es un cuerpo natural producto de la interacción de los factores formadores de suelo, es decir de los procesos pedogenéticos, intemperización y neoformación de minerales, descomposición y humificación de la materia orgánica, formación de estructura, traslocación de materia, uso y manejo por el hombre. Los suelos cumplen funciones ecológicas, de calidad y potenciales que ejercen gran influencia sobre la ecología vegetal, animal y en el hombre (Brady y Weil, 1996).

Las características de los suelos en cada punto del paisaje se desarrollan en función de sus factores formadores: relieve, material parental, clima, organismos y tiempo. Su acción conjunta determina la dirección, velocidad, y duración de los procesos que dan origen al suelo. Algunos autores incluyen a la hidrología (drenaje y red de distribución de aguas) y al hombre, como factores que se suman a los cinco anteriores (Núñez, 2003; Porta *et al*, 2003).

Los suelos se desarrollan en profundidad, por lo que se van diferenciando capas de espesor variable llamadas horizontes. Una sección vertical del suelo para caracterizar sus horizontes recibe el nombre de perfil. Los horizontes principales se designan con una letra mayúscula, el horizonte superior o "A" suele ser más rico en materia orgánica, lo que le brinda una coloración más oscura que los inferiores; suelos más desarrollados en su parte media suelen ser más ricos en arcilla, hierro, aluminio o humus y de coloración más clara que la superior, correspondiendo al horizonte B, por último, el horizonte C o capa mineral de material no consolidado a expensas del cual se forman los horizontes A y B, que se extiende hasta la roca consolidada (Thompson *et al.*, 1988). La profundidad del suelo indica, en la mayoría de los casos, que éste ha tenido tiempo para desarrollarse por encontrarse en una posición estable en el paisaje, sin recibir aportes de materiales (Birkeland, 1984).

El suelo es un sistema compuesto por tres fases: sólida, líquida y gaseosa. La fase sólida, está formada por partículas minerales y orgánicas; la fase líquida (solución del suelo) por agua, materiales coloidales y sustancias disueltas; la fase gaseosa (atmósfera del suelo) de aire y en menor proporción de otros gases (vapor de sulfuro, anhídrido carbónico, etc.). El suelo es una matriz compleja y generalmente las proporciones de sus componentes (Fig.1) son: 50% de material sólido (45% de partículas minerales y 5% de materia orgánica) y en un 25% de agua y 25% de aire, (Núñez, 2000).

En cualquier ecosistema el suelo, cumple con cinco funciones importantes (Brady y Weil, 1996):

1. Soporta el crecimiento de las plantas, siendo éste el medio para la fijación de raíces, y proveedor de nutrientes necesarios para su crecimiento.
2. Regulador del ciclo hidrológico, almacén y filtro del agua, de manera tal que afecta directamente su calidad y disponibilidad.
3. Transforma, filtra y amortigua de manera natural diversos tipos de contaminantes.
4. Es hábitat para un gran número de organismos.
5. Es soporte para la construcción de ciudades, y aporte de materiales para la construcción.

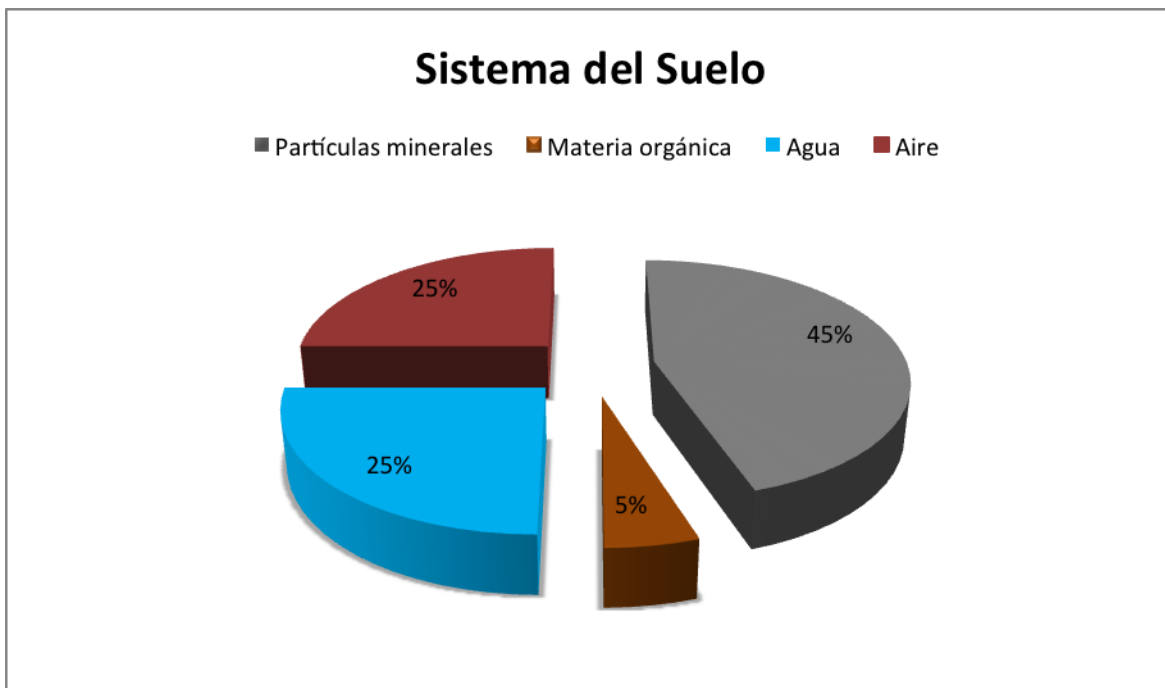


Fig. 1 Proporción ideal del sistema del suelo.

1.1 Epipedón

El epipedón, derivado del griego “ἐπί” (encima) y “πεδον” (suelo) es conocido como un horizonte superficial de diagnóstico. Se caracteriza por presentar un color relativamente oscuro debido a la incorporación de la materia orgánica por aporte de hojarasca y raíces, o por ser horizontes eluviales superiores, tiene como límite los 30 cm y 50 cm de profundidad o cuando se encuentra alguna capa que limite el crecimiento de las raíces, que puede ser la roca o una capa fuertemente cementada (duripán). La materia orgánica del suelo (MOS) es probablemente el criterio más importante para la caracterización y delimitación de fronteras del epipedón. Para que se trate de un epipedón se requiere la acción de procesos edafogenéticos, por lo que depósitos recientes finamente estratificados, no constituyen un epipedón (Aguilera, 1989; Stevenson, 1994; Porta 2003). Si hay presencia de mantillo en la parte superficial del suelo éste se considera como un elemento ajeno al epipedón (Spaargaren *et al*, 1998).

El suelo más superficial (epipedón) constituye la parte más importante del suelo para la producción de comida, manejo y control de la degradación del suelo, lo cual le atribuye una importancia ecológica dentro de un ecosistema; además, es la capa más superficial y, por tanto, la más variable a través del tiempo y el espacio, a diferencia de las capas inferiores, las cuales permanecen relativamente estables a lo largo del tiempo (Spaargaren *et al*, 1998).

1.2 Propiedades del suelo

1.2.1 Propiedades físicas

Las propiedades físicas del suelo, determinan en gran medida la capacidad de muchos de los usos a los que el hombre lo sujeta. La condición física de un suelo determina el desarrollo de raíces, la aireación, la capacidad de drenaje y de almacenamiento de agua, la plasticidad y la retención de nutrientes. Se considera importante conocer las propiedades físicas del suelo para entender en qué medida y cómo la actividad humana puede llegar a modificarlas, y comprender la importancia de mantener las mejores condiciones físicas del suelo posibles (Rucks *et al*, 2004).

1.2.1.1 Textura

Las partículas minerales del suelo han sido clasificadas con base en su tamaño, sin tomar en cuenta su composición química, color u otras propiedades. La textura del suelo es la proporción relativa de sus fracciones: arenas, limos y arcillas (partículas del suelo), excluyendo a la materia orgánica (componentes orgánicos), y enfocándose sólo a la fracción mineral del suelo (componentes inorgánicos) (Aguilera, 1989; Brown 2003).

Las fracciones de arena y limo, presentan una escasa área superficial debido a su tamaño, en consecuencia son poco activas físico-químicamente, y apenas contribuyen al intercambio de cationes, los cuales están sujetos a los minerales en la interfase sólido-líquido; sin embargo, participan de forma importante en la formación de macroporos que resultan determinantes para una buena circulación del aire y del agua. La fracción de arcilla es muy activa, hasta el punto de que determina, junto con el humus, casi la totalidad de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo, lo que se debe a su pequeño tamaño de partícula y su estructura en láminas, las cuales poseen un área superficial alta (Cuadro 1), y presenta una gran cantidad de sitios con carga eléctrica negativa, dotándolas así de una elevada capacidad de atracción y retención de agua y nutrientes (Parra *et al*, 2003).

Cuadro 1. Algunas características de las fracciones del suelo sobre la base del diámetro de partículas esféricas y densidad real =2.85 (Brady y Weil, 1996).

Fracción	Diámetro en mm	Número de partículas por gramo	Área superficial cm ² /g.
Arena muy gruesa	2.00 - 1.00	90	11
Arena gruesa	1.00 - 0.50	720	23
Arena media	0.50 - 0.25	5700	45
Arena fina	0.25 - 0.10	46000	91
Arena muy fina	0.10 - 0.05	722000	227
Limo	0.05 - 0.002	5776000	454
Arcilla	< 0.002	90260853000	8000000

La textura es una de las propiedades del suelo más estable a través del tiempo, y la importancia de su estudio radica en que permite inferir otras propiedades y características directamente relacionadas con el uso y comportamiento del suelo (Porta *et al*, 2003) algunos ejemplos son:

- ▶ Capacidad para almacenar nutrientes
- ▶ Facilidad para la circulación del agua
- ▶ Capacidad para la retención del agua y efecto capilar
- ▶ Riesgo de erosión hídrica y eólica
- ▶ Orden de magnitud de superficie específica

1.2.1.2 Densidad

La densidad se define como el peso por volumen de una sustancia; en el caso del suelo podemos distinguir dos tipos de densidad, la densidad aparente y la real (Fig. 2). La densidad aparente (DA) se define como la masa (peso) de una unidad de volumen de suelo seco; este volumen incluye el espacio poroso ocupado por el aire y líquidos; por lo tanto depende directamente de la composición y de las condiciones estructurales del suelo, tiende a variar según la clase textural del mismo, de manera tal que los suelos arenosos tienden a tener una densidad aparente elevada y, por el contrario, los suelos arcillosos tienen una densidad aparente baja (Chan, 2006; Brady y Weil, 1996).

La densidad real o densidad de partícula (DR) se define como la masa de las partículas del suelo, dividida por el volumen ocupado por los sólidos, excluyendo el espacio poroso. No está relacionada con el tamaño de partícula (textura) o el arreglo de las mismas (estructura) y depende directamente de la composición química y de la estructura cristalina de la fracción mineral del suelo (Brady y Weil, 1996; Skopp, 1999).

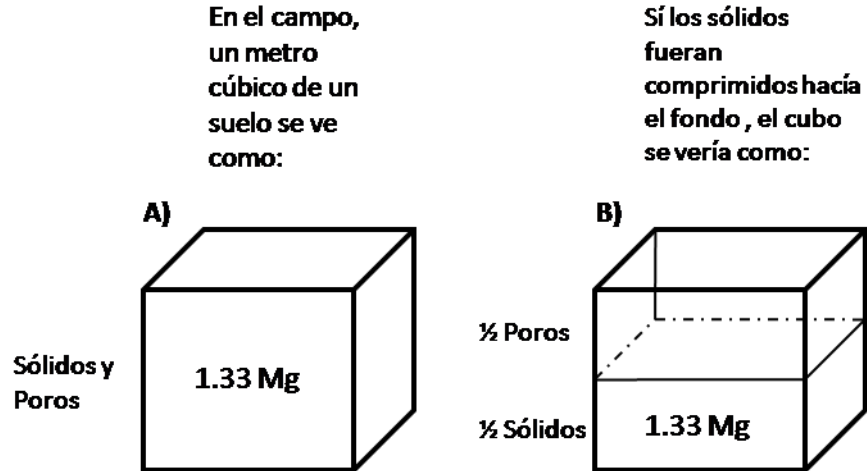


Fig. 2 Diferencias entre densidad real (a) y densidad de partícula (b) (Brady y Weil, 1996).

1.2.1.3 Porosidad

Corresponde a la porción de un volumen dado de suelo no ocupado por sólidos y que puede almacenar agua y/o aire. El espacio poroso es muy importante para el movimiento del agua y el aire. La cantidad de espacio poroso es determinado por el acomodo de las partículas sólidas. Idealmente un suelo debe tener un extenso grupo de poros lo suficientemente pequeños para resistir la infiltración por gravedad, y lo suficientemente grandes para permitir la circulación del agua. El tamaño de los poros está relacionado con el tamaño de las

partículas y estructura del suelo; el porcentaje de porosidad es calculado con base en la densidades (Aguilera, 1989; Brady y Weil, 1996; Pitty, 1979).

1.2.1.4 Color

El color es una propiedad cualitativa del suelo, su interés radica en que permite inferir fácilmente distintos estados de oxidación o reducción; así como el contenido de materia orgánica y componentes minerales como carbonatos óxidos y yeso, entre otros. El color puede haber sido heredado del material parental (color litogénico) o bien, puede ser el resultado de procesos pedogenéticos (Porta *et al.*, 2008), por ejemplo:

- ▶ Colores oscuros: alto contenido de materia orgánica; componentes ferromagnesianos; materiales piroclásticos (volcánicos); manganeso; sulfuros de hierro.
- ▶ Colores rojizos a pardos: óxidos de hierro con distinto grado de hidratación, buena aireación.
- ▶ Colores blancuzcos: carbonato de calcio; yeso; sales más solubles que el yeso.

Para evitar imprecisiones al describir el color del suelo, se utiliza un código de colores que permite una descripción más objetiva y una denominación normalizada: el código de Munsell, representado en las tablas del mismo nombre, las cuales están organizadas en un plano de tres dimensiones codificando el color mediante tres parámetros básicos que lo componen: Matiz, brillo (ordenada) y croma (abscisa) (Porta *et al.*, 2003).

1.2.2 Propiedades químicas

El agua es el principal agente disparador de las reacciones químicas que se llevan a cabo en la matriz del suelo (procesos de hidrólisis, oxido-reducción, disolución, lixiviación, etc.) y propicia la actividad biológica para la mineralización de la materia orgánica, por lo que la mayoría de los procesos químicos más importantes (benéficos o perjudiciales) ocurren en la solución del suelo (Brady y Weil, 1996; Snakin *et al.*, 2001).

1.2.2.1 Reacción del suelo o pH

El grado de acidez o alcalinidad es considerado como una variable clave que afecta a la mayoría de las propiedades del suelo (químicas, físicas y biológicas); una escala logarítmica es utilizada para medirlo y se expresa mediante el pH, el cual indica la actividad del ión de hidrógeno (H^+) y el ión hidroxilo (OH^-) en una solución acuosa. Estos iones son de gran importancia por su alta actividad química la cual es un buen indicador de los procesos químicos que ocurren en el suelo, los cuales afectan directamente la disponibilidad de nutrientes en solución útiles para las plantas, además de ser una guía para determinar algunas deficiencias y toxicidades (Brady y Weil, 1996; Hazelton *et al.*, 2007). La reacción del suelo generalmente limita el tipo de vegetación natural presente en el suelo (Cuadro 2), así como el rendimiento de los diferentes tipos de cultivos (Brady y Weil, 1996).

$$pH = - \log A_H^+$$

Donde: A_H^+ es la actividad del ion H^+ (tomado de Brady y Weil, 1996)

El pH del suelo presenta una resistencia a ser modificado, que se le denomina “capacidad de amortiguamiento”, esta capacidad previene variaciones rápidas y drásticas del pH en la solución del suelo, las cuales son perjudiciales para las plantas y microorganismos del suelo (Brady y Weil, 1996). El pH en los suelos forestales tiende a ser ácido en la mayoría de los casos, y está relacionado con la cantidad de materia orgánica (su descomposición libera diversos ácidos orgánicos en la solución del suelo). En los suelos forestales la acidez del pH no es limitante en el crecimiento de los árboles, pero su importancia radica en la relación directa con otras propiedades químicas encargadas de proveer nutrientes al suelo (CIC, MO, CO, N, K, entre los principales) (Fisher *et al*, 2000; Godbold, 2003).

Cuadro 2. Intervalos y efectos de pH establecidos por la USDA (Porta *et al*, 2003).

pH	Evaluación	Efectos Esperados en el Intervalo
< 4.5	Extremadamente ácido	Condiciones muy desfavorables.
4.5 – 5.0	Muy fuertemente ácido	Posible toxicidad por Al ⁺ y Mn ⁺ .
5.1 – 5.5	Fuertemente ácido	Exceso: Co, Cu, Fe, Mn, Zn. Actividad bacteriana escasa. Deficiencia: Ca, K, N, Mg, P.
5.6 – 6.0	Medianamente ácido	Intervalo adecuado para la mayoría de los cultivos.
6.1 – 6.5	Ligeramente ácido	Máxima disponibilidad de nutrientes.
6.6 - 7.3	Neutro	Mínimos efectos tóxicos.
7.4 – 7.8	Medianamente básico	Suelos generalmente con CaCO ₃ .
7.9 – 8.4	Básico	Disminuye la disponibilidad de P y B. Deficiencia de: Co, Cu, Fe, Mn, Zn.
8.5 – 9.0	Ligeramente alcalino	Clorosis férrica debida al HCO ₃ ⁻ .
9.1 – 10.0	Alcalino	Presencia de carbonato sódico
> 10.0	Fuertemente alcalino	Elevado porcentaje de sodio intercambiable. Toxicidad: Na, B. Actividad microbiana escasa. Micronutrientes poco disponibles.

1.2.2.2 Conductividad Eléctrica

Resulta de la habilidad para conducir electricidad de los iones con carga disueltos en una solución. Se mide en un extracto obtenido de una pasta saturada de suelo; por lo tanto, en algunos casos puede proveer información sobre los solutos que están en forma de cationes y aniones (Cuadro 3). La conductividad eléctrica (CE) es afectada por otras propiedades del suelo como la capacidad de intercambio catiónico, la salinidad, el tamaño y la distribución de las partículas, el contenido de humedad, etc. (Artiola, 2004). La medición de la conductividad eléctrica es una forma de determinar la salinidad de un suelo. Para suelos con un régimen de lluvias intenso con continua lixiviación de sales y buen drenaje la conductividad eléctrica generalmente será menor a 4 mS/cm^a (Núñez, 2000).

^a Se denomina siemens (S) a la unidad derivada del sistema internacional de unidades, y se emplea para la medida de la conductancia eléctrica (Baver, 1973).

Cuadro 3. Valores y efectos de la conductividad eléctrica en la solución del suelo (Núñez, 2000).

Conductividad Eléctrica (mS/cm)	Clasificación	Impacto en la Vegetación
< 2.0	No salino	Efecto de la salinidad casi nulo
2.0 – 4.0	Poco Salino	Rendimiento de los cultivos más sensibles afectados
4.0 - 8.0	Moderadamente Salino	Se reduce el rendimiento y crecimiento en diferentes especies vegetales
8.0 – 16.0	Muy Salino	Solo los cultivos y plantas tolerantes no se ven afectados
> 16.0	Extremadamente Salino	Sólo las especies vegetales muy tolerantes no se ven afectadas

1.2.2.3 Fósforo

El fósforo (P) es un elemento clave para la vida vegetal y animal en el suelo; sin él, las plantas no podrían crecer ya que es un componente esencial en las células y mejora muchos aspectos de la fisiología de las plantas. En el suelo generalmente se encuentra en concentraciones bajas y poco disponibles para las plantas, siendo en muchas ocasiones la principal limitante para el crecimiento adecuado de éstas (Cuadro 4). En la solución del suelo el P se encuentra en formas de HPO_4^{2-} (ión fosfato monoácido) y $\text{H}_2\text{PO}_4^{-}$ (ión fosfato diácido), su solubilidad es dependiente del pH, esto debido a que el P forma compuestos de baja solubilidad con el Aluminio (Al) y Hierro (Fe) en suelos ácidos de pH menor de 5 o en suelos básicos o alcalinos por hidrólisis del $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ en presencia de CaCO_3 . Estos compuestos son fijados a la parte mineral del suelo disminuyendo de manera importante la solubilidad del P; estas reacciones suceden de manera muy rápida, por lo general cuando P soluble es incorporado al suelo, una reacción remueve el P de la solución en unas pocas horas; por lo tanto, entre más tiempo permanece el P en el suelo se vuelve menos soluble y por consiguiente, menos disponible para las plantas (Brady y Weil, 1996).

Debido a su gran importancia para las plantas, el P es un elemento muy importante para la producción en los sistemas agrícolas (sólo le precede el N), por tal motivo el uso de fertilizantes con altos contenidos de P ha sido una constante entre los agricultores que pueden costearlo. La excesiva incorporación de fertilizantes al suelo con el objetivo de obtener mejores rendimientos en los cultivos ha provocado una acumulación de P, el cual en su mayoría no está disponible para las plantas, provocando alteraciones importantes del ciclo del P. Por otra parte, la pérdida del P contenido de manera natural en el suelo es un problema causado por las actividades antrópicas, mediante la alteración del horizonte superficial ocasionada por la deforestación y la cosecha (Brady y Weil, 1996; Shoji *et al*, 1993).

El aumento y la disminución de la cantidad de P en el suelo es de suma importancia debido a que el ciclo del P es muy balanceado y eficiente; cualquier alteración afecta directamente a la vegetación y al ecosistema, siendo el P culpable en algunos problemas ambientales. En países industrializados la constante y abundante aplicación de P a los suelos ha incrementado significativamente el nivel de este elemento en los horizontes superficiales aumentando la cantidad de P que es transportado por lixiviación y la erosión eólica hacia los cuerpos de agua, provocado una acelerada eutrofización por el exceso de P (Brady y Weil, 1996).

Cuadro 4. Clasificación para el fósforo disponible por el método de Bray-1 para suelos ácidos (CSTPA, 1980).

Clase	Fósforo (P), mg/Kg
Bajo	< 5.5
Medio	5.5 – 11.0
Alto	> 11.0

1.2.2.4 Capacidad de Intercambio Catiónico

Uno de los procesos más importantes para la vida vegetal es el intercambio de iones entre las partículas del suelo y las raíces de las plantas. Este intercambio de cationes y aniones toma lugar en la superficie de las fracciones coloidales de la materia orgánica e inorgánica del suelo (humus y arcillas); dichas partículas retienen y previenen que los iones de los elementos minerales esenciales (Ca, K, Na, Mg, NH₄, Cu, Zn, etc.) se pierdan por una excesiva lixiviación, y no puedan estar disponibles posteriormente para ser tomados por las raíces de las plantas (Brady y Weil., 1996).

De acuerdo con lo anteriormente comentado, la capacidad de intercambio catiónico (CIC) se define como la capacidad que tienen los coloides del suelo (humus y arcillas) de adsorber^b y desadsorber cationes que se encuentran disponibles en la solución del suelo (Núñez, 2000). Por lo tanto, indica la carga negativa presente por unidad de masa del suelo (Cuadro 5); comúnmente la CIC es expresada en centimoles de carga positiva por kilogramo del suelo: cmol₊/Kg ó cmol (+)/Kg (Regasamy *et al*, 1999); además, se encarga de amortiguar cambios bruscos en el pH, regular la disponibilidad de nutrientes, los niveles de calcio en el suelo y los cambios en su estructura; por tal motivo, una baja CIC indica que el suelo tiene una baja resistencia a los cambios químicos causados por el uso del suelo (Hazelton *et al*, 2007). Generalmente la CIC va a depender directamente de la clase textural y el pH; generalmente entre más arcilloso sea un suelo, más alta será, sucediendo lo contrario para suelos con pH ácido (Brady y Weil, 1996).

Cuadro 5. Valores para la capacidad de intercambio catiónico de un suelo (Hazelton *et al*, 2007).

Clasificación	CIC cmol (+)/Kg
Muy baja	<6
Baja	6 – 12
Moderada	12 – 25
Alta	25 – 40
Muy alta	>40

Los cuatro cationes más abundantes en el suelo son: Calcio (Ca⁺²), Magnesio (Mg⁺²), Potasio (K⁺²) y Sodio (Na⁺²). Los cationes Aluminio (Al⁺²), Manganeseo (Mn⁺²), Hierro (Fe⁺²), Cobre (Cu⁺²) y Zinc (Zn⁺²), y están comúnmente presentes en cantidades que no contribuyen significativamente a la CIC. Por lo tanto es una práctica común que sólo se midan las concentraciones de los cuatro cationes más abundantes; Cuadro 6 (Hazelton *et al*, 2007).

^b La adsorción es un proceso por el cual átomos, iones o moléculas son atrapadas o retenidas en la superficie de un material, en contraposición a la absorción, que es un fenómeno de volumen.

Cuadro 6. Niveles de cationes intercambiables en cmol/Kg (Hazelton *et al*, 2007).

Catión	Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto
Na	0 – 0.1	0.1 – 0.3	0.3 – 0.7	0.7 -2.0	>2
K	0 – 0.2	0.2 – 0.3	0.3 – 0.7	0.7 – 2.0	>2
Ca	0 - 2	2 – 5	5 - 10	10- 20	>20
Mg	0 – 0.3	0.3 – 1.0	1 - 3	3 - 8	>8

1.2.2.5 Materia orgánica

Todas las sustancias orgánicas, por definición, contienen carbón. La materia orgánica del suelo (MOS) contiene cerca de tres veces más carbón que el que se encuentra en la vegetación de todo el planeta. A pesar de constituir una pequeña fracción de la masa total de la mayoría de los suelos, su dinámica afecta de manera importante a la mayoría de los procesos en el suelo (Brady y Weil, 1996).

La MOS se define como una mezcla de residuos animales y vegetales en varios estados de descomposición, sustancias sintetizadas química y/o microbiológicamente a partir de productos orgánicos y su degradación, además de los cuerpos de los microorganismos vivos y muertos del suelo. Usualmente la MOS se subdivide en dos: sustancias húmicas y no húmicas (Fenton *et al*, 1999). Las primeras corresponden a sustancias resultantes de la alteración (desnaturalización, desorganización y cambios en la funcionalidad) de productos orgánicos sintetizados por las plantas y los microorganismos, con uniones en la fracción mineral; en un sentido estricto, suponen entre 60% y 80% de la MOS y constituyen su fracción más activa. Las sustancias no húmicas incluyen aquellas sustancias cuyas características químicas resultan identificables, tales como proteínas, aminoácidos, grasas y ácidos orgánicos, la mayoría de estas sustancias son fácilmente biodegradables, por lo que persisten por muy poco tiempo en el suelo (Porta *et al*, 2003).

El impacto principal de la humificación en la dinámica de un ecosistema es la captura de carbono, los compuestos orgánicos relativamente simples son removidos de los depósitos de la materia orgánica del suelo de fácil asimilación y rápida circulación para ser incorporados a las fracciones de materia orgánica con mayor estabilidad química y menor velocidad de circulación (Tate, 1992).

Los cambios en la cantidad de la MOS del suelo y su equilibrio, dependen de la interacción de varios factores como: clima, paisaje, textura, y disturbio. Estos factores, llamados factores de capacidad de la MOS controlan procesos fundamentales en el suelo como la humificación, estabilidad de agregados, traslocación (movilidad vertical de la materia orgánica), erosión, lixiviación y mineralización (Dick *et al.*, 2004).

Cuadro 7. Clasificación del carbono y materia orgánica en suelos derivados de cenizas volcánicas (Fassbender, 1994).

Clase	Carbono (C) %	Materia orgánica %
Muy bajo	< 1.2	< 2
Bajo	1.2 – 2.9	2 – 5
Medio	2.9 – 4.6	5 – 8
Alto	4.6 - 8.7	8 – 15
Muy Alto	> 8.7	< 15



Figura 3. Funciones atribuidas a la MOS, las flechas grises indican las interacciones que pueden ocurrir entre las clases de funciones (Baldock y Skjemstad, 2001).

La cantidad de materia orgánica en el suelo es dependiente de un complejo grupo de interacciones y procesos químicos físicos y biológicos (Figura 3) y puede variar desde menos de 1% en suelos con textura gruesa, hasta casi 100% en pantanos y humedales. En general, la MOS se encuentra en un intervalo de 1% a 10% (Cuadro 7), y su composición química puede variar dependiendo del tipo de suelo, pero en promedio contiene cerca de 50% de carbono (C), 40% oxígeno (O), 5% hidrógeno (H), 4% nitrógeno (N) y 1% azufre (S) (Dick *et al.*, 2004; Fenton *et al.*, 1999).

La MOS es un componente clave en la creación y mantenimiento de un suelo de calidad. Muchas de las propiedades del suelo (CIC, actividad microbiana, agregación del suelo, retención del agua, etc.) son directamente afectadas por la cantidad y presencia de la MOS. Indirectamente influye en la calidad del aire y del agua que interactúa con el suelo, y cuando el agua se infiltra a través del suelo favorece el proceso de mineralización; la actividad biológica soportada por el suelo transforma las sustancias contenidas en el agua, además; la producción y emisión de gases de efecto invernadero están relacionados en cómo la MOS es manejada. (Birkeland, 1984). Además de poseer un potencial importante para el secuestro de CO₂^c, y una fuerte influencia en la degradación de plaguicidas y contaminantes orgánicos presentes en el suelo (Fenton *et al.*, 1999).

^c El secuestro de carbono es el proceso de extracción del carbono o del CO₂ de la atmósfera para ser almacenado en un depósito natural (océanos, suelos, bosques).

1.2.2.6 Carbono

Los bosques representan un importante reservorio de carbono que corresponde a 80% del total contenido en los ecosistemas terrestres. (Kolhmaier *et al*, 1998). Los principales almacenes de C en los bosques son: la vegetación (biomasa aérea y biomasa radicular), la materia en descomposición (mantillo y materia leñosa muerta) y el suelo (Ordóñez y Maserá, 2001).

El carbono que se encuentra en el suelo puede estar en formas inorgánicas y orgánicas (Noble *et al*, 2000). En los suelos forestales, el carbono inorgánico se encuentra en muy pequeñas concentraciones, por lo que la gran mayoría de ésta se encuentra en forma orgánica. En los suelos de los bosques las entradas de materia orgánica predominantes corresponden a los residuos de hojas y raíces muertas y a los exudados radiculares, también llamados mantillo (Tate, 1992).

Los diferentes almacenes de carbono^d que existen en el suelo tienen distintos tiempos medios de residencia dependiendo de su origen y estructura molecular, variando éstos de unos días a semanas (compuestos metabólicos vegetales o de bajo peso molecular como azúcares simples); meses a décadas (compuestos estructurales vegetales como celulosa o lignina) (Aviña, 2008; Tate, 1992).

El carbono almacenado en el suelo y en los residuos vegetales de los bosques constituyen los depósitos más cuantiosos de carbono en los ecosistemas forestales (Oliva y García-Oliva, 1998). No obstante, existen variaciones importantes entre los distintos ecosistemas y tipos de bosque; en los ecosistemas boreales entre el 80 y 90% del carbono está almacenado en los suelos, en tanto que en los bosques tropicales húmedos el carbono se encuentra distribuido casi en partes iguales entre el suelo y la vegetación (Bolin y Sukumar, 2000). La causa principal de esta diferencia es la influencia de la temperatura y disponibilidad de agua en los índices relativos de producción y descomposición de la materia orgánica; las temperaturas más cálidas y húmedas provocan la rápida mineralización de la materia orgánica del suelo (Aviña, 2008).

1.2.2.7 Nitrógeno

El Nitrógeno (N) es requerido en grandes cantidades para el desarrollo de los organismos del suelo (plantas y microorganismos) y está íntimamente asociado con diversas reacciones bioquímicas. Es el nutriente mineral más demandado por las plantas y después del Carbono (C), Hidrógeno (H) y Oxígeno (O) es el elemento más común en los vegetales. La productividad de la mayoría de los ecosistemas es limitada por la disponibilidad de Nitrógeno. Su buen suministro para las plantas estimula el crecimiento y desarrollo de las raíces, y otorga un intenso color verde a las hojas. Es tomado por las plantas en forma aniónica (Nitratos NO_3^- y Amonio NH_4^-) mediante la solución del suelo, éste se encuentra principalmente en la fracción orgánica y está vinculado a las tres fases del suelo (sólida, líquida y gaseosa). La forma orgánica es la más abundante y debe ser mineralizada para estar disponible para las plantas; la cantidad de N inorgánico intercambiable y soluble raras veces excede un 2% del N total del suelo; Cuadro 8 (Brady y Weil, 1996, De las Salas, 1987; Fassbender *et al*, 1994).

^d En términos generales, los almacenes de carbono o sumidero de CO_2 es un depósito natural o artificial de carbono, que absorbe el carbono de la atmósfera y contribuye a reducir la cantidad de CO_2 del aire. Los principales almacenes de carbono son los océanos, los suelos y los bosques.

Los problemas ambientales causados por el N son principalmente asociados con la alteración de su ciclo. De manera natural existe una movilización del N del suelo hacia los cuerpos de agua y la atmósfera (desnitrificación). Las actividades agrícolas, mediante el empleo de fertilizantes, alteran la cantidad y la forma en la que el N es liberado del suelo ocasionando algunos inconvenientes como la eutrofización de los cuerpos de agua producida por la lixiviación del N (en forma de nitratos NO_3^-), así como su liberación desproporcionada forma de gas (óxido nitroso NO_2) hacia la atmósfera, mediante una serie de reacciones bioquímicas producidas por bacterias anaerobias, contribuyendo así al efecto invernadero, el calentamiento global y la destrucción de la capa de ozono (Brady y Weil., 1996; Fassbender *et al*, 1994).

Cuadro 8. Valores en porcentaje de Nitrógeno total en el suelo (Bruce *et al*, 1982)

Valor (en %)	Descripción
<0.05	Muy bajo
0.05 – 0.15	Bajo
0.15 - 0.25	Medio
0.25 – 0.50	Alto
>0.5	Muy alto

El N total mide la cantidad total de N presente en el suelo, mucho del cual está asociado a la materia orgánica y, por lo tanto, como se mencionó anteriormente, hasta ser mineralizado no está inmediatamente disponible para las plantas. El N total no puede ser utilizado como una medida de las formas mineralizadas de N (NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^-) ya que estas se encuentran retenidas en la MOS (Hazelton *et al*, 2007).

1.2.2.8 Relación C/N

La relación carbono/nitrógeno de un suelo puede ser utilizada, desde el punto de vista agrícola y forestal, como un indicador de su fertilidad. Esta relación indica la capacidad de descomposición de la MOS, así como la intensidad de mineralización del humus, que depende del contenido de N de la MOS (Cuadro 9). Además, la acción de los microorganismos puede mineralizar o inmovilizar el N. El principal factor que determina la mayoría de estos procesos es la relación carbono/nitrógeno (C/N) del suelo (Thompson *et al*, 1988).

El N de la MOS queda disponible para las plantas superiores cuando la relación C/N se aproxima a 10:1, la liberación de N es baja porque el proceso de mineralización en suelos forestales es lento. Al existir mayor acumulación de humus, hay menos N disponible, y su contenido aumenta hasta que la cantidad de C en la fracción orgánica se ha reducido a una relación inferior de 20:1 (León, 2007).

Cuadro 9. Relación carbono/nitrógeno (Moreno, 1978).

Clase	C/N
Muy alta	>25
Alta	15 - 25
Mediana	10 – 15
Baja	8 -10
Muy baja	<8

2. Geoestadística

La geoestadística es una rama de la estadística que trata fenómenos espaciales (Journel y Huijbregts, 1978). Su interés primordial es la estimación, predicción y simulación de dichos fenómenos (Warrick y Myers, 1987). Esta herramienta ofrece una manera de describir la continuidad espacial, que es un rasgo distintivo esencial de muchos fenómenos naturales, y proporciona adaptaciones de las técnicas clásicas de regresión para tomar ventajas de esta continuidad (Isaaks y Srivastava, 1989). Otra definición refiere a un conjunto de técnicas numéricas que estudian datos espaciales, donde la correlación espacial es modelada por medio del variograma, teniendo como objetivo predecir valores en sitios no muestreados (Armstrong, 1998; Olea, 1999). Es importante resaltar que en geoestadística el propósito esencial es la interpolación y, si no hay continuidad espacial, pueden hacerse predicciones carentes de sentido o erróneas (Giraldo, 2002).

2.1 Interpolación espacial

La interpolación espacial asume que los lugares más cercanos son más similares que los lugares que están más apartados. Concretamente, su objetivo general es llenar los huecos entre los datos existentes. La mayoría de los métodos de interpolación utilizan distancias euclidianas para calcular el peso de los datos vecinos, mismos que utiliza para calcular el valor de los sitios no muestreados (Johnston, 2001; Krivoruchko y Gribov, 2004).

Los métodos de interpolación son numerosos y variados y, de manera general, se pueden dividir en dos tipos: deterministas y geoestadísticos. Los primeros se caracterizan por formular suposiciones sistemáticas no contrastadas en la variación de los datos, que se apoyan comúnmente en principios matemáticos y geométricos; y no proporcionan errores de las estimaciones; algunos ejemplos de interpolaciones deterministas son: el inverso de la distancia ponderada (Inverse Distance Weighting, IDW), spline, polígonos de Thiessen o la triangulación. Los segundos estudian el carácter de la autocorrelación espacial de la variable a interpolar; para ello, utilizan métodos estadísticos y toman en cuenta el grado y el tipo de autocorrelación que existe en la variable de estudio. El método geoestadístico más común y utilizado es el Kriging (Cañada, 2008; Johnston, 2001; Webster y Olivier 2007).

2.2. Kriging

Es un método geoestadístico de predicción o estimación para procesos espaciales aleatorios en el espacio geográfico (Olivier, 2010). Se utiliza el término de Kriging derivado de la contribución en el año de 1951 del ingeniero D.G. Krige el cual empleó métodos de estimación en depósitos de oro en Sudáfrica aplicando geoestadística lineal (Webster y Olivier, 2007). A diferencia de otros métodos de interpolación el Kriging permite obtener mapas de probabilidad, además de proporcionar los errores en la estimación de las predicciones (Olivier, 2010). Existen varios tipos de Kriging, los cuales parten del mismo principio básico de autocorrelación espacial, pero difieren para acoplarse a la distribución y tipo de datos (continuos, categóricos, binarios, enteros, etc.) a interpolar; y al número de variables a analizar. Algunos ejemplos de Kriging son: ordinario, simple, universal, disyuntivo, cokriging, etc. (Armstrong, 1998; Johnston, 2001).

2.3. Kriging Ordinario

Se considera por algunos autores como el mejor estimador lineal insesgado, debido a que minimiza la varianza de la predicción, además de ser el más utilizado en la práctica (Cañada, 2008; Webster, 2008). De manera

general, el Kriging ordinario utiliza semivariogramas y covarianzas para expresar la autocorrelación, transformaciones para eliminar tendencias y también permite la generación de medidas de error. Este tipo de interpolador asume que la media local es desconocida y que el proceso es estacionario, esto es, que si dos lugares están a una distancia y dirección similar tendrán similares diferencias al cuadrado entre sus valores (Cañada, 2008).

El modelo del Kriging Ordinario se expresa por la siguiente fórmula (Webster y Olivier, 2007):

$$Z(s) = \mu + \epsilon(s)$$

Donde: μ es la media de los datos, y $\epsilon(s)$ son los errores con dependencia espacial

La predicción de un lugar es:

$$Z(S_0) = \sum^n \lambda_1 Z(S_1)$$

Donde:

$[Z(S_0)]$ es el valor pronosticado de un lugar, (λ_1) es el peso calculado para cada valor observado y $[Z(S_1)]$ es el valor observado de un lugar.

Para realizar las predicciones mediante Kriging ordinario, se tiene que efectuar un análisis preliminar de los datos el cual permite estimar la precisión del mismo (Cañada, 2008; Sommers *et al* 2000.), el cual consiste en:

1. Análisis exploratorio estadístico
2. Modelación del variograma
3. Análisis de anisotropía
4. Búsqueda de vecindad
5. Validación Cruzada

2.3.1. Análisis exploratorio estadístico

Se realiza para poder examinar la distribución general de los datos a partir de su frecuencia, obteniendo así las medidas de centralidad. Éstas nos dan una idea de dónde está el centro y otras características de la distribución (media, mediana y cuartiles), así como las medidas de dispersión, que detectan las diferencias de los valores con respecto del valor medio. En cierta manera miden la anchura de la distribución (varianza y desviación) y las medidas de forma que miden el grado de concentración de la masa de los valores a un lado u otro de la media y en la distribución de frecuencias (sesgo y curtosis^e). El conocimiento de estas medidas es importante debido a que algunos métodos de interpolación como el Kriging ordinario requieren que los datos se ajusten a una distribución normal. En caso de presentarse, se elimina el efecto negativo de valores aberrantes en la distribución mediante transformaciones matemáticas (Cañada, 2008).

^e Curtosis: Es una medida que determina el grado de concentración que presentan los valores en la región central de la distribución, indicando que tan abultada se encuentra la distribución alrededor de la media (Cañada, 2008).

Sesgo: Medida nos permite identificar si los datos se distribuyen de forma uniforme alrededor del punto central (media aritmética). La asimetría presenta tres estados diferentes. Se dice que la asimetría es positiva cuando la mayoría de los datos son mayores a la media aritmética, la curva es simétrica cuando se distribuyen en ambos lados de la media y se conoce como asimetría negativa cuando la mayor cantidad de datos se aglomeran en los valores menores que la media (Cañada, 2008).

2.3.2. Modelación del variograma

El variograma es la función que se usa más frecuentemente para describir la variación espacial de una propiedad del suelo o cualquiera otra variable (Fig. 4). Expresa matemáticamente el modo en que la semivarianza de una propiedad cambia al aumentar la distancia, es decir, modela su autocorrelación espacial (Sommers *et al.*, 2000). La autocorrelación espacial asume que las cosas que están más cerca son menos parecidas a las que están más lejos, además se asume el principio de estacionariedad (Webster, 2008).

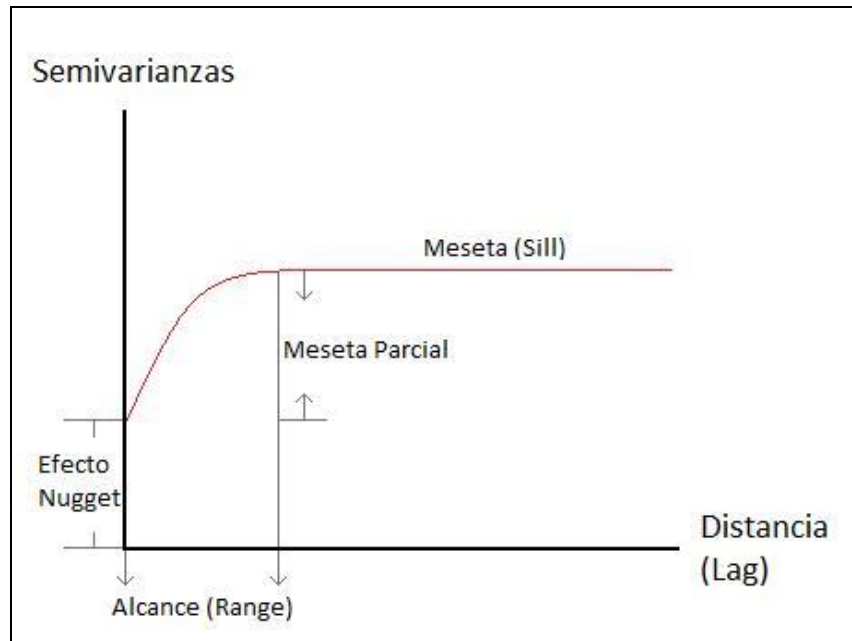


Fig. 4 Modelo de un semivariograma típico (Webster y Olivier 2007).

Existen varios modelos de funciones que ajustan al variograma, pero hay unos parámetros que son comunes a todos. La meseta o *sill* es el valor estable de la semivarianza de una variable a una cierta distancia, que ocurre si el proceso es estacionario. Muchas veces está compuesto de dos partes: una discontinuidad en el origen, que se denomina efecto *nugget* o efecto pepita, y la meseta parcial o *partial sill*, que juntos conforman la meseta. El alcance o *range* es la distancia a partir de la cual el valor de la varianza de una variable se estabiliza e indica la distancia hasta la que influye es su entorno cada punto. El alcance es un parámetro muy importante ya que muestra que la variabilidad de un hecho geográfico es independiente a partir de esa distancia; es decir, la autocorrelación sólo aparece dentro del alcance del variograma (Cañada, 2008; Sommers *et al.*, 2000). El variograma puede presentarse en forma sólo de *nugget*, lo que significa que no hay correlación espacial en los datos y pueden ser tratados por métodos de estadística clásica (Sommers *et al.*, 2000).

2.3.2.1 Análisis de Anisotropía

Para poder delimitar las áreas del suelo de acuerdo con sus propiedades es necesario establecer la variación espacial en una superficie. En el caso de que la variación sea igual en dos dimensiones que definen la superficie se le denomina isotropía, en el caso de que sean diferentes, anisotropía. Para identificar esta última se calcula el variograma en diferentes direcciones (Sommers *et al.*, 2000).

2.3.2.2 Búsqueda de Vecindad

La búsqueda de vecindad limita el número y la configuración de los puntos que se van a utilizar en la predicción, utilizando dos mecanismos de control: la forma de vecindad y el establecimiento de las restricciones de los puntos dentro de la forma. La forma de vecindad estará dictada por las influencias direccionales de los datos de entrada; si existe isotropía, los puntos utilizados para predecir se elegirán en todas direcciones, adoptando la forma de un círculo. Por el contrario, si existe anisotropía entonces se elegirá una elipse como forma de búsqueda de vecindad. Definida la forma, hay que establecer las restricciones dentro de la misma; para ello, se elige el número de puntos a utilizar en la predicción y, posteriormente; para evitar tendencias en una determinada dirección el círculo o la elipse son divididos en secciones en los que se elige igual número de puntos (Cañada, 2008; Sommers *et al.*, 2000).

2.3.2.3 Validación Cruzada

Existen diferentes métodos estadísticos para comprobar la validez del modelo de variograma. Uno de los más utilizados es la validación cruzada, la cual utiliza todos los datos muestrales para estimar el modelo de autocorrelación, sustituye un valor muestral por uno nuevo, que predice a partir del resto de la muestra; posteriormente, compara el valor de la predicción de ese punto con el valor real; este proceso se repite con cada uno de los puntos observados y, al final, la validación cruzada compara los valores observados con los calculados (Cañada, 2008).

Además de la validación cruzada podemos consultar la precisión de las predicciones mediante algunos parámetros estadísticos. La media es representada por el promedio de los errores estimados y también nos indica qué tan sesgadas son las predicciones; entre esté más cercana al cero, menores serán los errores de los valores predichos contra los reales. La media estandarizada es otro parámetro que debe estar cercano al cero, y es más utilizada debido a que la media está influida por la escala de los datos. También se puede medir la variabilidad de las predicciones mediante el error estándar de la predicción, el cual debe estar cercano al error cuadrático medio; si es así, la variabilidad de la predicción se calcula correctamente. También se calcula el error cuadrático medio estandarizado que, si es próximo a 1, los errores de la predicción son válidos; si es más grande que 1, se está subestimando la variabilidad de las predicciones y viceversa (Cañada, 2008).

II. OBJETIVOS

General

- ▶ Determinar la distribución espacial de los suelos en función de sus propiedades físicas y químicas en el horizonte superficial y su relación con algunas variables ambientales en dos comunidades vegetales de *Pinus hartwegii* y *Abies religiosa* de la cuenca del río Magdalena, D.F.

Particulares

- ▶ Determinar las propiedades físicas y químicas del horizonte superficial del suelo en dos comunidades vegetales en la cuenca del río Magdalena.
- ▶ Determinar la relación entre las propiedades físico-químicas, la altitud y la orientación de la pendiente en el horizonte superficial del suelo en dos comunidades vegetales en la cuenca del río Magdalena.
- ▶ Realizar el análisis geoestadístico de las propiedades físicas y químicas del suelo.
- ▶ Realizar mapas predictivos de la distribución espacial de las propiedades físico-químicas en el horizonte superficial del suelo en dos comunidades vegetales en la cuenca del río Magdalena.

III. ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca del Río Magdalena se localiza en el extremo suroeste de la Cuenca de México (Fig. 5); se encuentra dentro de la Sierra de las Cruces teniendo como coordenadas 19° 13' 53" y 19° 18' 12" norte y 99° 14' 50" y 99° 20' 30" oeste, abarca parte de las delegaciones Magdalena Contreras, Álvaro Obregón y Cuajimalpa.

Al norte limita con los pueblos de San Bartolo Ameyalco, Santa Rosa y el Desierto de los Leones, siendo sus límites al sur, los montes de la Hacienda de la Esclava y el Ejido San Nicolás Totolapan. Ocupa una extensión total de 2,925 ha. La altitud mínima es de 2570 msnm en el noreste, y corresponde al límite del área ecológica con la urbana, mientras que la altitud máxima se registra hacia el suroeste en el cerro el Muñeco con 3850 m de altitud (Ávila-Akerberg, 2002).

3.1 Características del medio físico

El territorio de la cuenca del Río Magdalena pertenece a la provincia fisiográfica del Sistema Volcánico Transversal, dentro de la subprovincia de Lagos y Volcanes de Anáhuac (INEGI, 1998).

Debido al relieve montañoso se reconoce la importancia de los elementos del medio físico, el cual presenta cambios sustanciales de vegetación en distancias cortas; así mismo, la geología y el relieve controlan la red hidrográfica, la cual presenta en la vertiente oriental una orientación dominante de oeste a este. El relieve, la exposición de las laderas a la radiación solar y la litología son factores que, en algunos casos, condicionan el clima, el suelo y la vegetación (Castillo, 2003).

3.2 Geología

La cuenca del río Magdalena abarca gran parte de la formación que lleva el nombre de la Sierra de las Cruces; abarca parcialmente una unidad del grupo Chichinautzin. Se encuentran depósitos de tobas sobre flancos de las laderas, además de depósitos aluviales del Cuaternario. Las rocas tienen un origen ígneo y en su mayoría son del tipo andesita, basalto y dacita (Castillo, 2003).

La formación Tarango se origina a partir de los cambios posteriores al tectonismo, las rocas que la conforman son poco consolidadas y fueron arrasadas por vía fluvial y depositadas en extensos abanicos aluviales en el flanco este de la Sierra de las Cruces, dando origen a dicha formación, que actualmente ocupa toda la parte baja de la cuenca a partir de los 2800 m de altitud (Ávila-Akerberg, 2002).

Las fracturas que existen en la cuenca del río Magdalena, son diversas, y se localizan en el oeste y en su mayoría tienen rumbo al Oeste-Este. Existen fracturas que han sido ocupadas por corrientes tales como los arroyos Las Regaderas, El Agua Escondida y El Potrero (Álvarez, 2000).

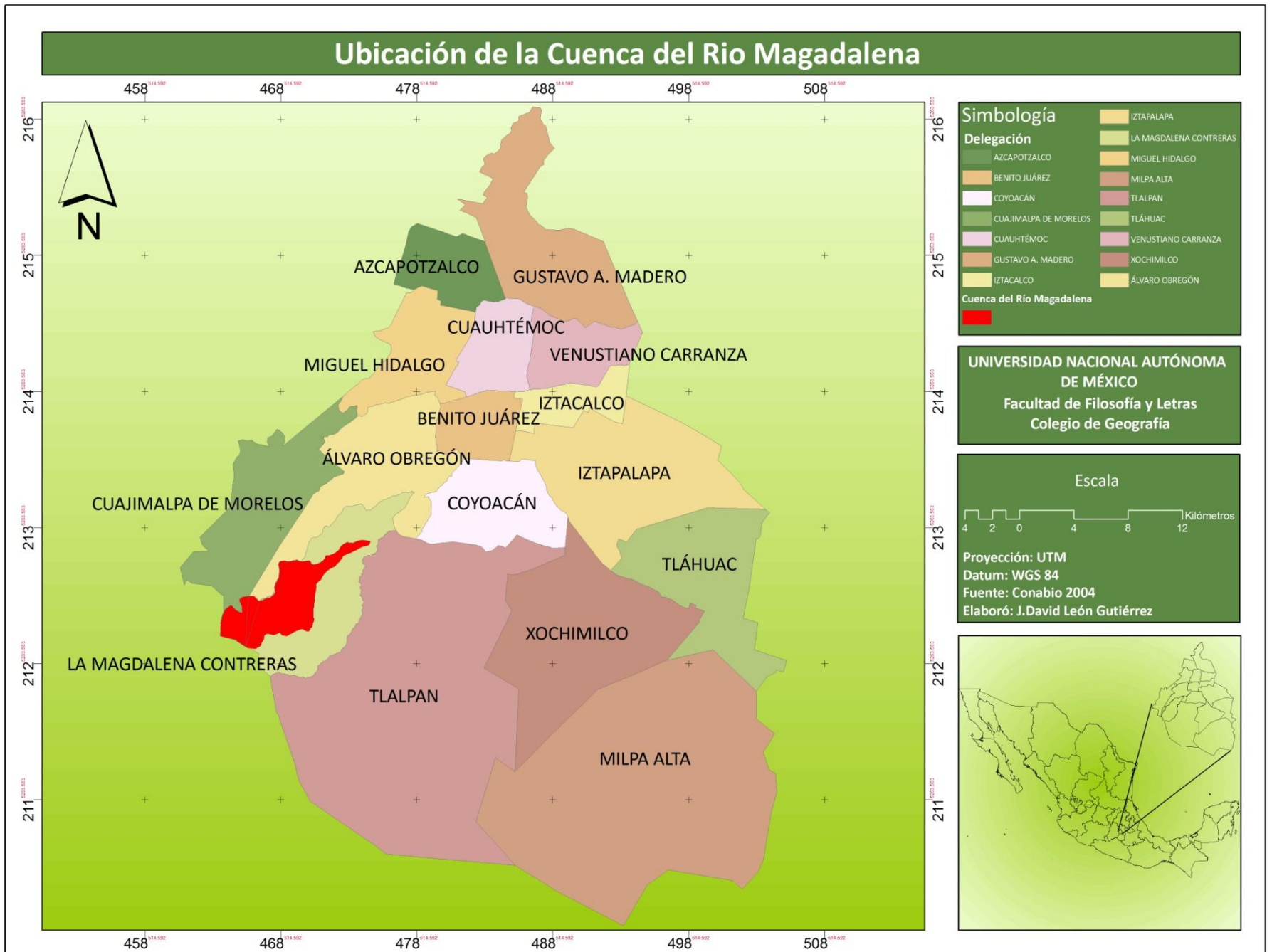


Fig. 5 Mapa de ubicación de la cuenca del Río Magdalena en el D.F.

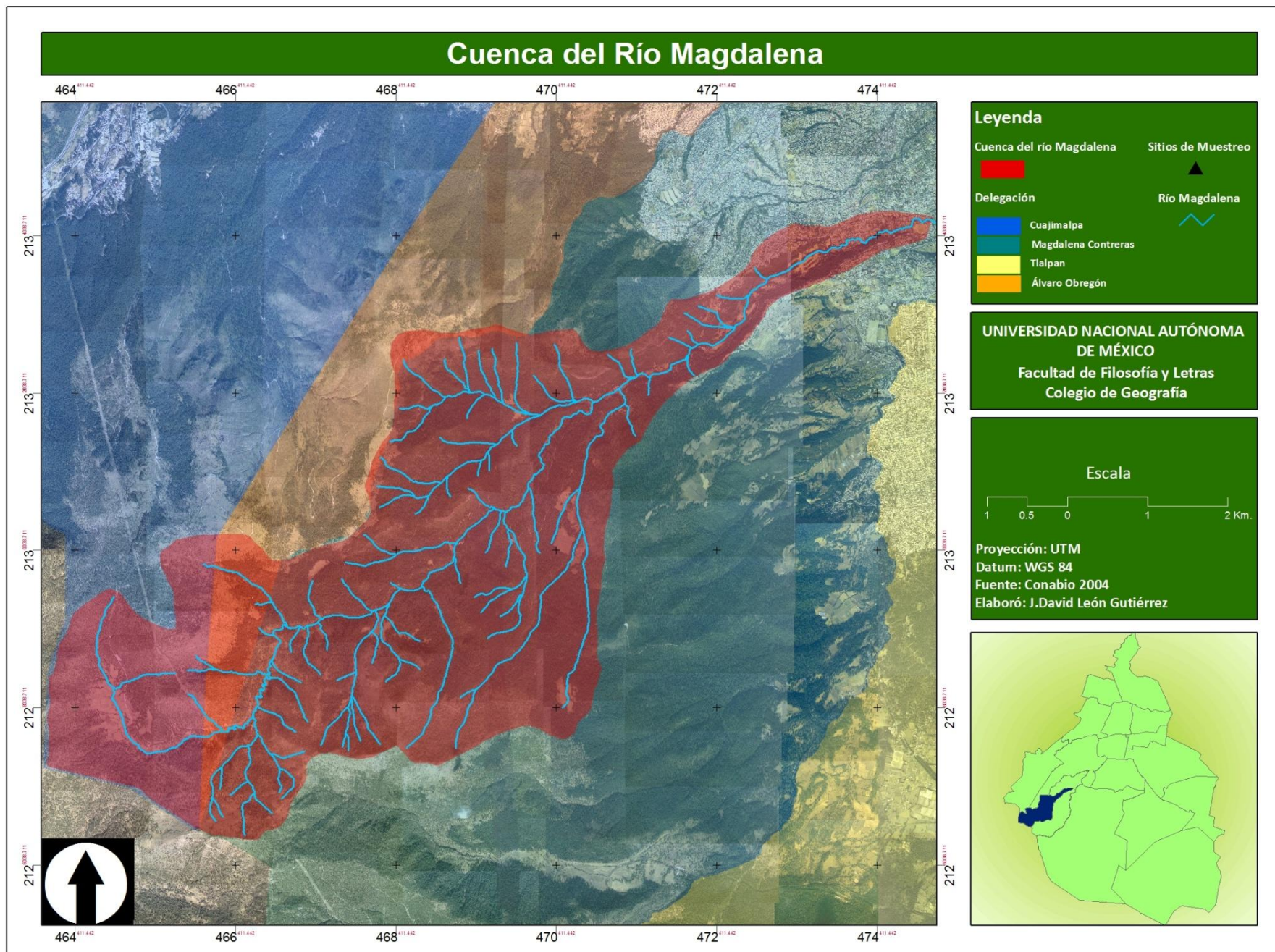


Fig. 6 Mapa de la cuenca del Río Magdalena.

3.3 Clima

El clima de la Ciudad de México está influenciado por los sistemas atmosféricos tropicales y extra tropicales. Esto se refleja en un periodo de poca precipitación, con bajas temperaturas y relativamente seco en los meses que corresponden al invierno, el cual contrasta con el periodo de precipitaciones y altas temperaturas en los meses correspondientes al verano (Castillo, 2003).

En el caso del periodo de influencia extra tropical, los vientos se asocian a la presencia de las masas polares provenientes del norte; este tipo de vientos causan el descenso de la temperatura que no producen suficientes lluvias y sí causan otro tipo de fenómenos como es el caso de la inversión térmica en la cuenca de México. El clima de la Cuenca del Río Magdalena, está controlado por la ubicación continental y el relieve montañoso, mismo que favorece las condiciones siguientes (Castillo, 2003):

- ▶ La concentración de humedad en las laderas montañosas y los valles: en el primer caso depende de la morfología cóncava, convexa o recta, la cual favorece, según el tipo, la concentración de humedad y la orientación que tienen las laderas con respecto a la exposición de la radiación solar. Los valles son lugares que retienen mayor humedad, y dependen de la anchura y profundidad así como de la capacidad de la cuenca para captar agua.
- ▶ En el relieve montañoso la temperatura desciende conforme aumenta la altitud; el gradiente vertical de la temperatura es de 0.5 a 1 grado centígrado cada 100 m, dependiendo de la humedad del aire.

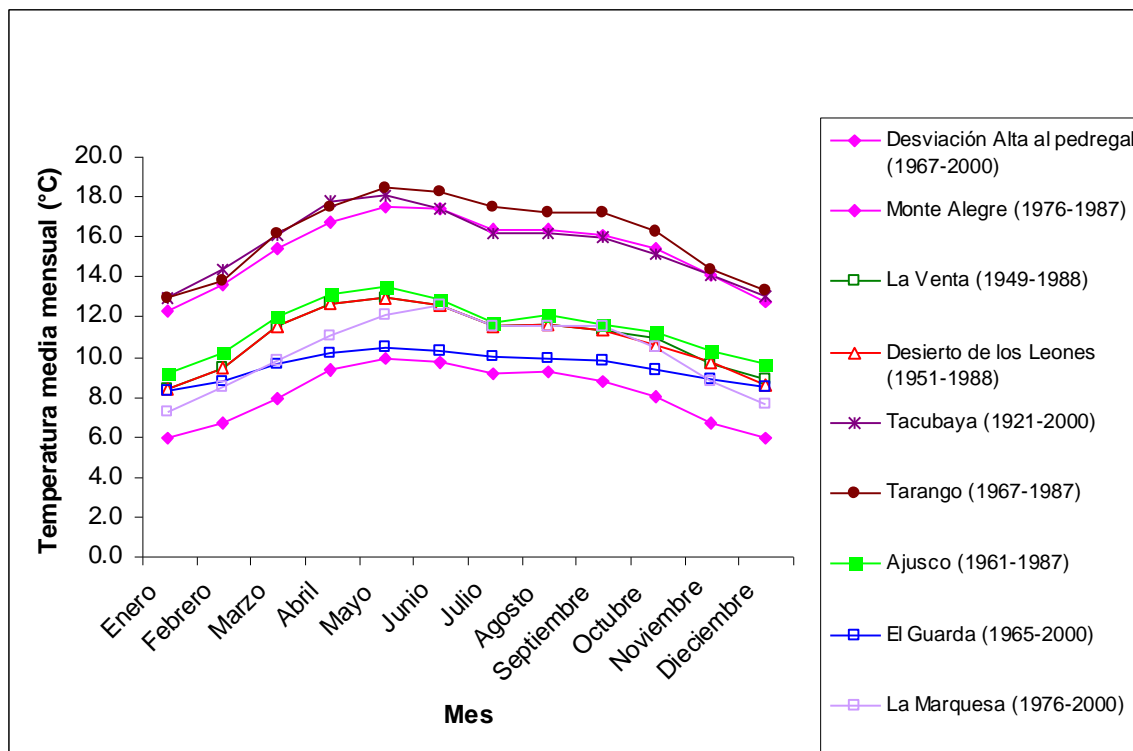


Figura 7. Temperaturas medias mensuales de nueve estaciones meteorológicas cercanas a la cuenca del río Magdalena, D.F.

Las características del clima de la CRM se analizaron con la ayuda de datos de nueve estaciones meteorológicas cercanas al área de estudio, principalmente con datos de las estaciones Desviación del Pedregal (2400 msnm) y Monte Alegre (3200 msnm).

Las temperaturas tienen una marcada variación estacional; los meses más fríos son de noviembre a febrero, mientras que la temperatura aumenta notoriamente en los meses de abril, mayo y junio. Se observa que las estaciones más próximas a la cuenca (Desviación alta al Pedregal y Monte Alegre) reportan las temperaturas más extremas, debido a la altitud (Fig. 7).

En cuanto a la precipitación, se observa que los niveles más altos ocurren en los meses de junio a septiembre, siendo la temporada de secas de noviembre a marzo. También se aprecia que los valores más altos de precipitación se registran en la estación de Monte Alegre, la cual es favorecida por la altitud y el relieve montañoso (Fig. 8).

Las lluvias para esta zona son muy intensas, dando evidencia de la disposición hídrica de la cuenca y, por ende, de su importancia para el mantenimiento de diversas comunidades vegetales (Ávila- Akerberg, 2002).

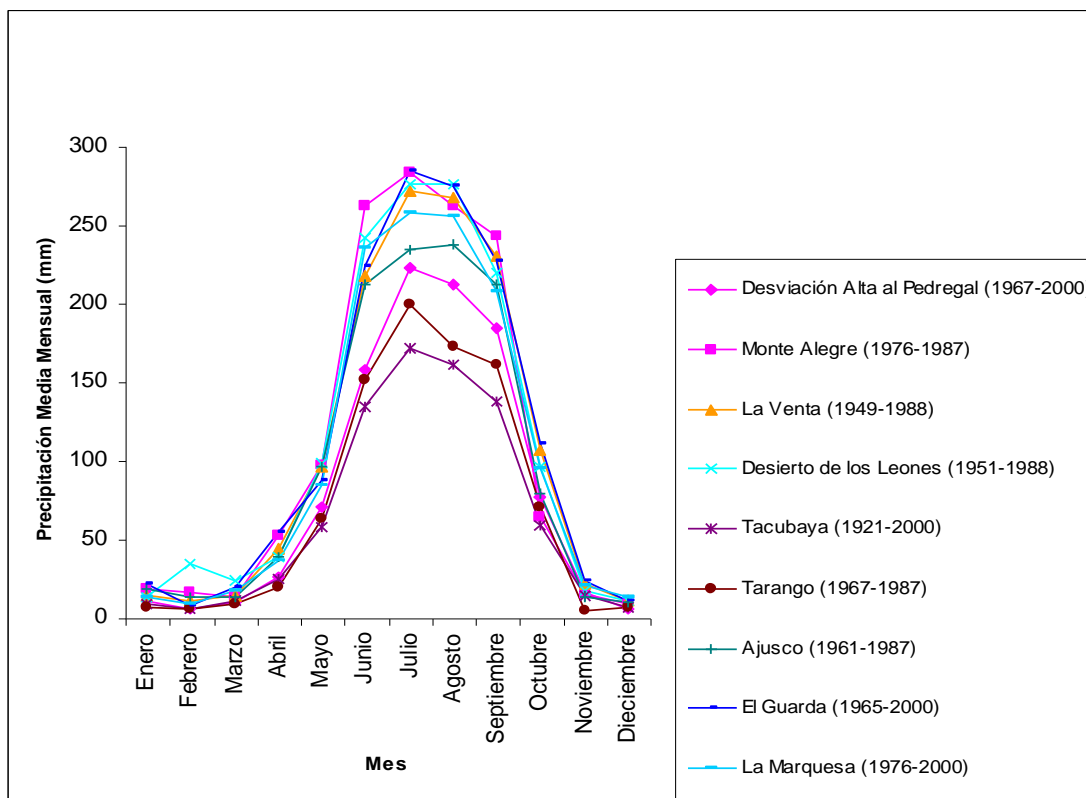


Figura 8. Precipitación media mensual de nueve estaciones meteorológicas cercanas a la cuenca del río Magdalena, D.F.

Con los datos de las estaciones meteorológicas se realizó una clasificación de los climas basada en el sistema de Köppen modificado por García, donde se reconocen tres tipos de climas (García, 1981):

1. C (w2)(w): Templado subhúmedo con lluvias en verano, precipitación invernal menor a 5%. Se localiza en la superficie de piedemonte y en las laderas bajas, en un piso altitudinal de 2450 a 2800 msnm.

2. C (c)(w2)(w): Semifrío subhúmedo con lluvias en verano y precipitación invernal menor a 5%. Se presenta a lo largo de las laderas de montaña entre los pisos de 2800 a 3600 msnm.
3. C (c)(m)(w): Semifrío húmedo con lluvias en verano y precipitación invernal menor a 5%. Se presenta en las zonas más altas del relieve montañoso a una altitud mayor a los 3600 msnm.

El clima está determinado por el tipo de relieve, y en el territorio de la cuenca los climas son más fríos y húmedos conforme aumenta la altitud, estos se ubican en la porción suroeste, la cual pertenece a la parte más alta, mientras que en la parte Noreste se encuentra un clima templado.

3.4 Hidrología

El río Magdalena se origina cerca de Puerta del Pedregal a los 3640 msnm y recorre la cañada de Cieneguillas (Fig. 6). Tiene como afluentes los escurrimientos del Chinaco, San Miguel y Media Luna. Sin embargo, el río más importante en cuanto al aporte de agua, es el Acopilco (Ávila-Akerberg, 2002).

El cauce del río Magdalena tiene una longitud total de 21600 m, de los cuales 13000 recorren los bosques de la cuenca. Posteriormente, el río entra a zona urbana hasta llegar a la presa Anzaldo con un recorrido de 4000 m. A partir de ahí, el río es entubado y dirigido hacia el río Churubusco en un recorrido de 2000 m. Las aguas continúan su trayecto hasta desembocar en la cuenca del Valle de México a través de los túneles artificiales de Tequisquiác, para posteriormente llegar a la cuenca del río Tula (Álvarez, 2000).

La estructura geológica de la sierra de las Cruces y las precipitaciones han permitido que la zona mantenga una infiltración constante, generando una fuente de almacenamiento de agua subterránea (Álvarez, 2000).

3.5 Vegetación

La zona de estudio está comprendida en la provincia Florística de las Serranías Meridionales, dentro de la región Mesoamericana de montaña (INEGI, 1998). La caracterizan elementos holárticos predominantes en el estrato arbóreo, así como neotropicales, que son más abundantes en los estratos arbustivos y herbáceo, formando un complejo mosaico de vegetación. Las áreas montañosas aisladas propician el desarrollo de numerosos endemismos (Rzedowski, 1978). De acuerdo con Rzedowski (1978), las comunidades vegetales presentes en la cuenca son: bosques de *Abies religiosa*, de *Pinus hartwegii* y de *Quercus spp* (Fig. 9). Debido al gradiente climático y las condiciones de humedad de la zona, la vegetación presenta una disposición en bandas altitudinales más o menos bien definidas, el bosque de *Quercus* y el bosque mixto.

La cuenca del Río Magdalena presenta una dominancia de *Abies religiosa*, cubriendo 40% de ésta, de la cual su porción de bosque cerrado tiene 34% y 6% en el bosque abierto. La segunda cobertura que más se presenta en la cuenca, es la de *Pinus hartwegii* con 20%, comprendida por 10.8% con densidad abierta y 9.68% con cerrada. La tercera categoría que más encontramos es el ecotono de bosque de *Abies religiosa*-*Pinus hartwegii* con 13.6%, cuya densidad es 12.95% cerrada y 0.66% es abierta.

Las superficies cubiertas por cada una de las clases de cobertura vegetal y uso de suelo se muestran a continuación:

Cuadro 10. Áreas de las clases de la cobertura vegetal y uso de suelo en la Cuenca del Río Magdalena, (Galeana, 2008).

Clases	Polígonos	Área (ha)	%
Agricultura	22	31.98	1.07
Asentamientos humanos	18	99.60	3.34
Bosque de <i>Abies religiosa</i> abierto	60	183.08	6.14
Bosque de <i>Abies religiosa</i> cerrado	4	1012.09	33.95
Bosque de <i>Abies religiosa</i> - <i>Pino hartwegii</i> abierto	13	19.69	0.66
Bosque de <i>Abies religiosa</i> - <i>Pino hartwegii</i> cerrado	15	386.21	12.95
Bosque de <i>Abies religiosa</i> - <i>Pino sp.</i> Abierto	4	16.49	0.55
Bosque de <i>Abies religiosa</i> - <i>Quercus sp.</i> Cerrado	1	11.38	0.38
Bosque de <i>Quercus sp.</i> cerrado	1	59.73	2.00
Bosque de <i>Quercus sp.</i> - <i>Pino sp.</i> Cerrado	1	17.27	0.58
Bosque de <i>Pino hartwegii</i> abierto	28	322.14	10.80
Bosque de <i>Pino hartwegii</i> cerrado	11	288.56	9.68
Bosque de <i>Pino hartwegii</i> - <i>Abies religiosa</i> cerrado	11	192.19	6.45
Bosque de <i>Pino sp.</i> abierto	3	20.57	0.69
Bosque de <i>Pino sp.</i> cerrado	2	6.47	0.22
Bosque de <i>Pino sp.</i> - <i>Abies religiosa</i> cerrado	5	12.21	0.41
Bosque Mixto	4	143.24	4.80
Cuerpos de agua	1	0.17	0.01
Pastizal	64	164.15	5.51
Plantación forestal	3	6.51	0.22
Total	266	2981.53	100

Por último, la cobertura de bosque de *Pinus hartwegii*-*Abies religiosa* cerrado presenta un 6.45%, el bosque Mixto un 4.8% y el bosque de *Quercus* un 2% (Galeana, 2008).

De acuerdo con Nava (2002), la cuenca alta del río Magdalena presenta tres comunidades vegetales:

- a) *Pinus hartwegii* (3420-3800 msnm).
- b) *Abies religiosa* (2750-3500 msnm), Bosque mixto.
- c) *Quercus sp.* (2620-3370 msnm), con ocho asociaciones, las cuales coinciden con los tres pisos altitudinales definidos: superior, medio e inferior.

A continuación se detallan:

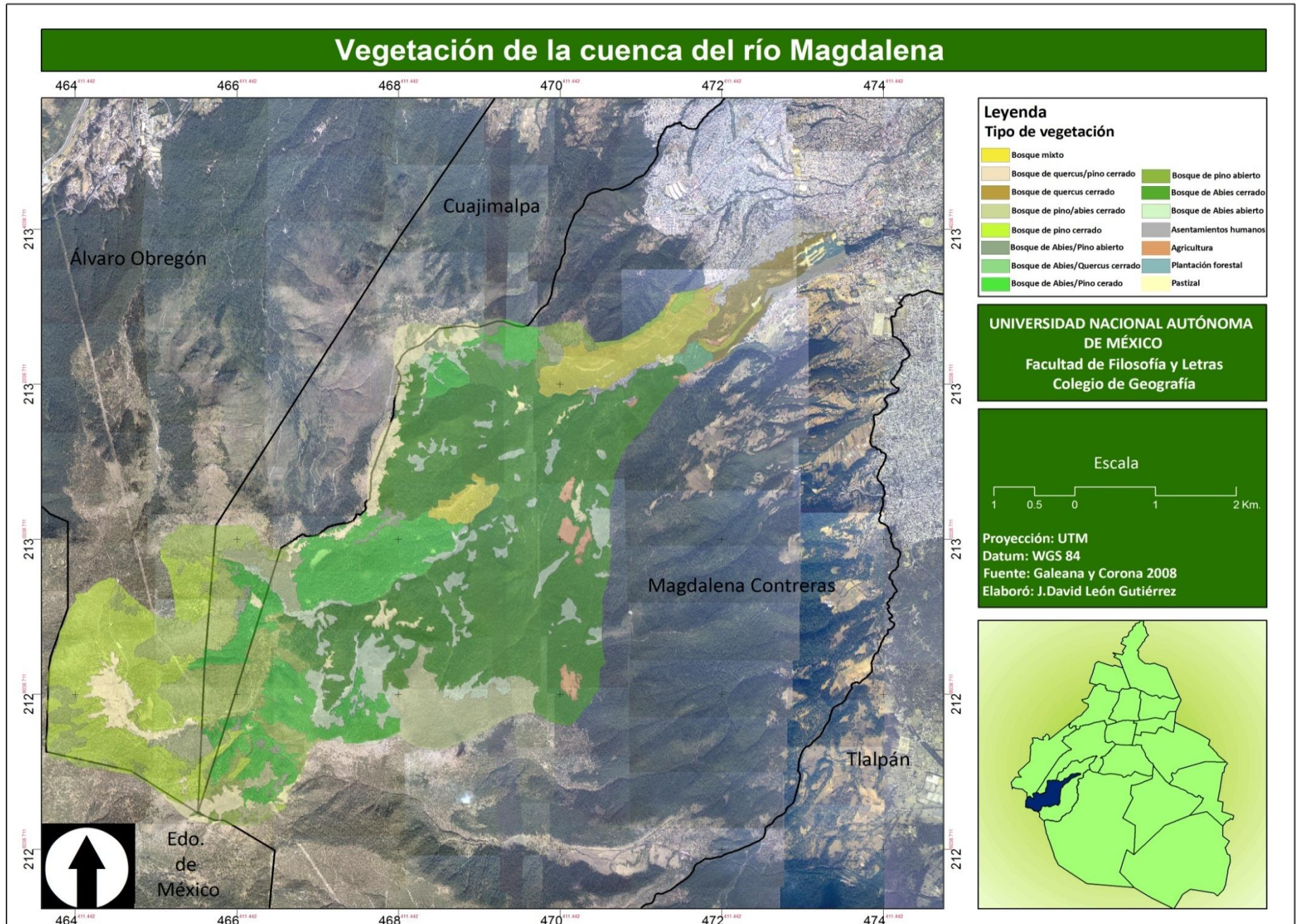


Fig. 9 Mapa de vegetación de la cuenca del río Magdalena (Galeana, 2008).

La comunidad de *Pinus hartwegii*, que ocupa el piso altitudinal superior, presenta dos asociaciones representadas por *Muhlenbergia quadridentata* y *Calamagrostis tolucensis*, determinadas por el porcentaje de cobertura. Es la comunidad menos diversa del área, presentando tan sólo 97 especies.

La comunidad de *Abies religiosa* ocupa el piso altitudinal intermedio. Es la más diversa de toda el área (116 spp.) y la mayor extensión dentro de la cuenca. Presenta dos asociaciones, una con *Senecio angulifolius* y otra con *Acaena elongata* ambas especies indicadoras de perturbación (Nava, 2002).

El bosque mixto y de *Quercus*, distribuido en el piso altitudinal inferior, es la segunda comunidad en cuanto a diversidad se refiere (113 spp.). Es la más cercana a los asentamientos humanos, razón que explica el número de especies ruderales registradas (30 spp.) su estructura es compleja por la gran variedad de especies arbóreas que presenta, razón por la que recibe el nombre de Bosque mixto (Nava, 2002).

3.6 Suelos

Para la cuenca del río Magdalena existen diversas unidades edáficas. Éstas se han desarrollado a partir del sustrato geológico volcánico, así como por la descomposición y acumulación de plantas y animales y por la acción de los elementos climáticos sobre el relieve (Álvarez, 2000).

En el área de estudio se observan tres tipos de suelos: los andosoles, los feozems y los litosoles (Castillo, 2003). La presencia de este tipo de suelos muestra la relación de éstos con la litología del lugar. Éstos suelos se asocian a tres factores: El material geológico o parental, el grado de alteración física y química de las rocas y, por último, a la pendiente del terreno y los procesos erosivos (Castillo, 2003).

3.6.1 Andosol

Los andosoles encontrados en la cuenca son: húmico, ócrico y mólico (Álvarez, 2000). El húmico tiene un epipedón úmbrico, rico en materia orgánica y humus, pero ácido y pobre en nutrientes (saturación de bases <50%). En la parte superior generalmente se encuentra una capa orgánica, compuesta básicamente por hojarasca de pinos y encinos, presenta una textura de migajón arenoso muy fino y tiene una alta porosidad; el otro tipo de epipedón se refiere a un mólico rico en materia orgánica y alta disponibilidad de nutrientes (saturación de bases >50%). Los andosoles principalmente se presentan sobre toda la superficie montañosa, en donde la litología es de lavas andesíticas y dacíticas (Castillo, 2003).

Su fertilidad depende del tipo de subgrupo al que pertenezcan; para la cuenca se registra el tipo háplico, de fertilidad de moderada a alta (Aguilera, 1989).

3.6.2 Feozem

Se localizan en la parte más baja de la cuenca, donde la vegetación predominante es el bosque mixto con dominancia de *Quercus sp*; la zona se caracteriza por ser húmeda y tener un periodo marcado de secas. De acuerdo con Castillo (2003), se pueden encontrar dos tipos de feozem háplico y mólico con un horizonte B cámbico o argílico o un C. En la CRM se encuentran a lo largo del piedemonte y en los llanos de origen volcánico (Castillo, 2003).

3.6.3 Litosol

Se localiza en zonas muy específicas dentro de la CRM; es el suelo con menor porcentaje de cobertura; su distribución se limita a tres zonas, todas localizadas en la zona noroeste, distribuidas en la parte baja, media y alta, que se caracterizan por ser superficies escarpadas, donde las características del relieve, como la pendiente, influyen directamente sobre la acumulación de los materiales edáficos y no han permitido el desarrollo de los suelos (Castillo, 2003).

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Diseño del Muestreo

La selección de los sitios de muestreo se realizó de acuerdo con tres criterios: la altitud, el tipo de vegetación y las características de la pendiente. Primeramente, se dividió la cuenca en tres zonas altitudinales: baja (2500–3000 msnm), media (3000–3400 msnm) y alta (3400–3800 msnm); posteriormente los sitios (51 en total) se seleccionaron dentro de dos tipos de vegetación (*P. hartwegii* y *A. religiosa*). La ubicación de los sitios dependió en gran parte por el relieve de la zona, debido a que el acceso a muchas zonas está limitado por la pendiente y el mal estado de los caminos (Fig. 10).

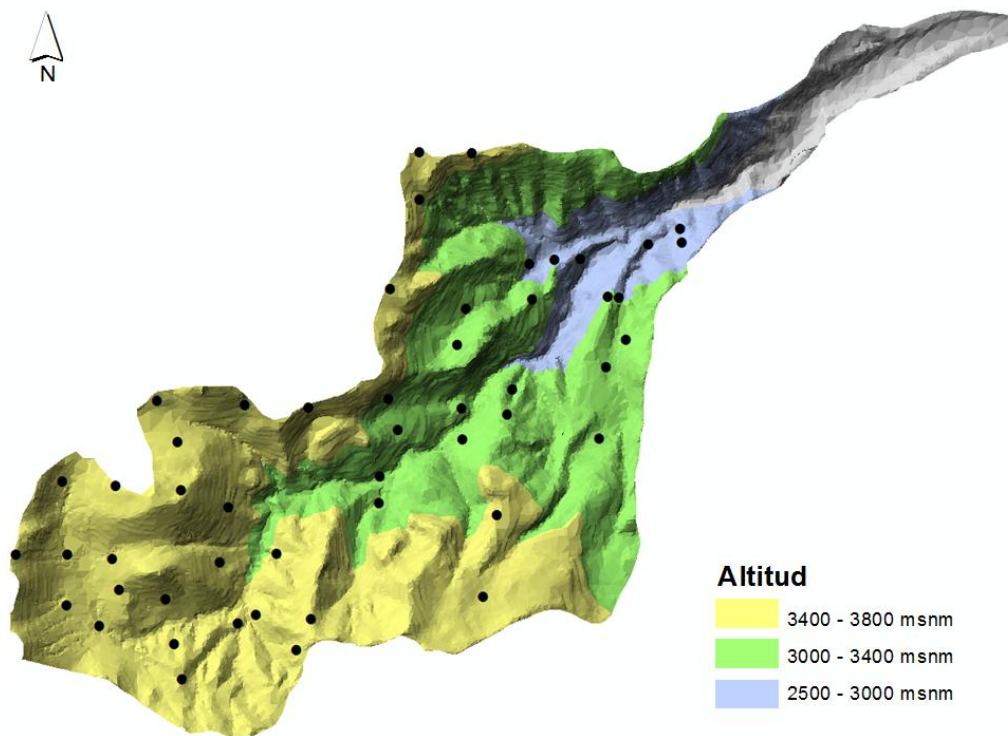


Fig. 10 Sitios de muestreo y clases altitudinales en la CRM.

4.2 Unidad de Muestreo

Mediante el mapa de vegetación y el de orientación de la pendiente de la CRM, se realizó un muestreo del epipedón (el cual comprende en promedio los primeros 30 cm de profundidad del suelo), tratando de obtener una muestra representativa de la zona de estudio.

El método empleado en campo para la colecta de suelo, se basó en un diseño anidado (Ordóñez, 2002), que permitió la colecta de muestras y sus réplicas (Figura 11); se seleccionaron 51 sitios donde se obtuvieron las muestras de suelo.

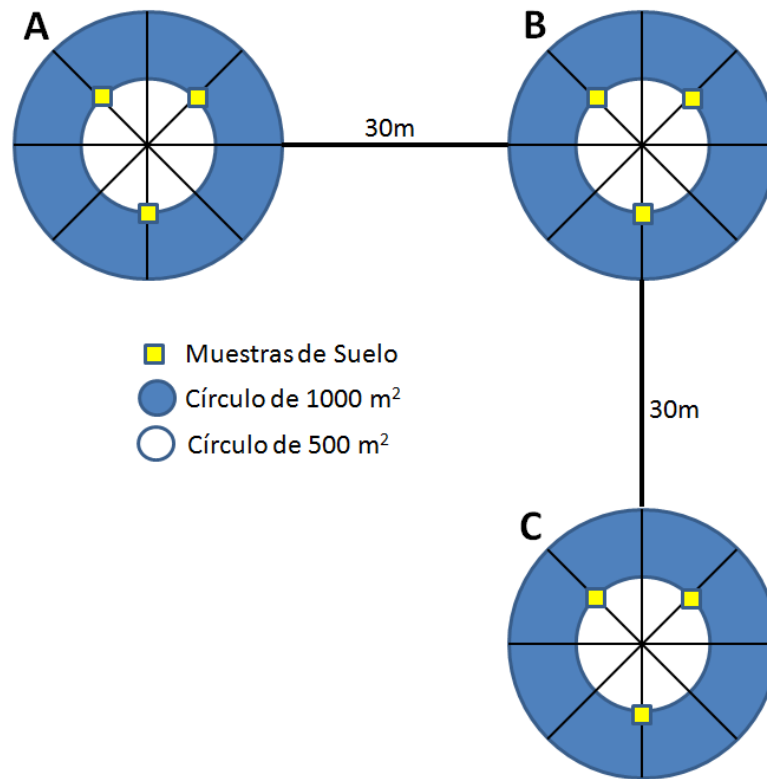


Fig. 11 Diseño de muestreo anidado para cada sitio (Fuente: Ordoñez, 2002).

En cada uno de los sitios de muestreo se eligió aleatoriamente un punto que sirvió de centro para el primer círculo (A) de 1000 m² el cual tiene un radio de 17.84 m (radio que fue compensado según el porcentaje de pendiente existente en el sitio). A partir de este punto se trazaron los transectos que permitieron el establecimiento de los otros 2 círculos (B y C) en cuyo interior se ubicaron los 3 cuadros de 50 cm x 50 cm sobre la circunferencia del círculo interior de 500 m², para la colección de las muestras de suelo, colectándose un total de nueve muestras por sitio.

4.3 Trabajo de Campo

- ▶ Inició con un recorrido previo del área de estudio para ubicar los sitios de muestreo utilizando la cartografía temática de la CRM.
- ▶ Se describieron las características del sitio de acuerdo con los parámetros establecidos por la USDA, tipo de vegetación, tipo de pendiente y orientación, principalmente.
- ▶ Se realizó una excavación de un cubo de 50x50x50 cm para, así, poder obtener las muestras de suelo.
- ▶ En cada sitio se tomaron con pala tres muestras de alrededor de 500 g en los tres círculos; posteriormente, las muestras se guardaron en bolsas oscuras debidamente etiquetadas y fueron colocadas en una hielera con elementos fríos para conservarlas a una temperatura de aproximadamente 4°C y evitar la pérdida de humedad
- ▶ Una vez en el laboratorio, las nueve muestras pertenecientes a cada sitio fueron homogenizadas para, así, obtener una muestra por sitio; posteriormente, se almacenó en un frasco hermético de polietileno y se mantuvo en refrigeración hasta su análisis.

4.4 Método de laboratorio

Determinación de las propiedades físicas y químicas de las muestras.

Todas las muestras fueron previamente tamizadas en húmedo^f, en un tamiz del número 10 (<2mm); posteriormente, fueron almacenadas en refrigeración en frascos de polietileno. El valor del porcentaje de humedad fue fundamental para poder corregir el peso del suelo húmedo a seco en la determinación de los análisis físicos y químicos realizados.

Los análisis físicos y químicos de las muestras se llevaron a cabo en la Unidad de Análisis Ambiental (UNAAMB) del departamento de Ecología y Recursos Naturales de la Facultad de Ciencias de la UNAM. El tamizado y porcentaje de humedad de las muestras fueron realizados en los talleres del Instituto de Geología de la UNAM.

4.4.1 Análisis Físicos

4.4.1.2 Porcentaje de Humedad

El porcentaje de humedad se realizó por el método gravimétrico, pesando 10 g de suelo húmedo y secándolo en una estufa a una temperatura constante de 105°C (Baver, 1975).

4.4.1.3 Textura

Las muestras fueron pesadas en húmedo (50 g calculando el peso seco), y se sometieron a un pretratamiento para eliminar las sustancias cementantes; La materia orgánica se eliminó con peróxido de hidrógeno al 8%, los óxidos amorfos con oxalato de amonio 0.2 M, los sesquióxidos con citrato de sodio 0.3 M y ditionito de sodio 1 M, se lavaron con agua desionizada bajando su conductividad a menos de 100 μ Siemens y, finalmente, se utilizó Hexametáfosfato de sodio para facilitar la dispersión de las partículas. Posteriormente, las muestras fueron analizadas por el método del hidrómetro de Bouyoucos, el cual se basa en la sedimentación secuencial, a diferentes tiempos, de las arenas, limos y arcillas de la muestra (Bouyoucos, 1963).

4.4.1.4 Densidad Aparente

Para la determinación de la densidad aparente se utilizó el método del cilindro; se utilizaron cilindros de 100 ml para obtener muestras inalteradas de suelo, las cuales se secaron a 105 C° para obtener su peso constante y, posteriormente, para relacionar el peso del suelo seco con el volumen (g/cm³) de la muestra (Baver, 1975).

^fEl proceso de secado al aire o en estufa de los andosoles reduce los valores de arcilla, porosidad total y conductividad hidráulica, así como aumenta los valores de densidad aparente y produce grandes cambios en la textura (Pinzón, 1993; Shoji *et al*, 1993; Warkentin, 1992). En algunas propiedades químicas está reportado que con el secado se disminuye el valor de la CIC y del fósforo soluble (Rahman *et al*, 2008; Shoji *et al*, 1993).

4.4.1.5 Densidad Real o de Partículas

La densidad real fue determinada por el método del picnómetro^g, se utilizaron picnómetros de 25 ml, primero se obtuvo el peso constante de cada picnómetro para posteriormente ser pesado con agua destilada; posteriormente, con 5 g de suelo y, finalmente, con suelo y agua (Baver, 1975).

4.4.1.6 Porosidad

Se calculó a partir de la densidad real (DR) y la densidad aparente (DA), según la siguiente ecuación:

$$\text{Porosidad total} = 100 - [(DR \times 100) / DA] \text{ (Baver, 1975).}$$

4.4.1.7 Color

Se determinó por medio del método colorimétrico de Munsell, utilizando la tabla de Munsell (2000).

4.4.2 Análisis Químicos

4.4.2.1 pH en agua y KCl

Se llevó a cabo en un extracto de 3 g de suelo con 30 ml de agua destilada (relación 1:10) y el pH en cloruro de potasio con 30 ml de KCl 1M (relación 1:10); posteriormente, las muestras se dejaron en agitación por 18 horas, para realizar la medición con un potenciómetro marca Hanna con electrodo de platino (ISRIC, 1992).

4.4.2.2 Conductividad Eléctrica

Se determinó con un conductímetro marca Hanna en una solución de suelo y agua desionizada relación 1:10 (Jackson, 1982).

4.4.2.3 Fósforo Disponible

La extracción del fósforo (P) se realizó por el método de Bray y Kurtz (1945), modificando el tiempo de extracción (10 minutos) y la relación suelo/solución (1:7). Dicha técnica se basa en el efecto solubilizador de los iones de hidrógeno (H⁺) en el P del suelo, y la habilidad del ion de flúor (F⁻) para disminuir la actividad del aluminio (Al⁺) y, en menor medida, reducir la actividad del calcio (Ca⁺) y el hierro (Fe⁺) en el sistema de extracción. El método se limita a suelos con valores de pH menores a 6.8 y con textura limosa y arcillosa (Soil plant and analysis council, 1992).

4.4.2.4 Capacidad de Intercambio Catiónico

^g El picnómetro o botella de gravedad específica, es un frasco con un cierre sellado de vidrio que dispone de un tapón provisto de un finísimo capilar, de tal manera que puede obtenerse un volumen con gran precisión. Esto permite medir la densidad de un fluido, en referencia a la de un fluido de densidad conocida (Baver, 1973).

Los cationes intercambiables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+), se extrajeron con una solución de acetato de amonio 1N a pH 7. La determinación de Ca^{2+} y Mg^{2+} se hizo por espectrometría de absorción atómica, en un equipo Perkin Elmer Analyst 800. La determinación de Na^+ y K^+ , se hizo por espectrofotometría de flama, en un equipo JENWAY, modelo PFP7 (Jackson, 1982; UNAAMB, 2008).

4.4.2.5 Carbono Orgánico, Materia Orgánica y Nitrógeno Total

La cuantificación de carbón orgánico total y nitrógeno total se realizó en un equipo analizador CHNS/O Perkin Elmer 2400; la muestra de suelo (previamente molida) es colocada dentro de la cámara de combustión a una temperatura de alrededor de 900°C en un ambiente de oxígeno puro, proceso que provoca la liberación de CO_2 , mismo que es cuantificado con un detector de infrarrojo (Fernández *et al*, 2006). El contenido de materia orgánica se obtuvo multiplicando el contenido de carbono orgánico por el factor 1.724, bajo el supuesto de que la MOS contiene 58% de carbono (Jackson, 1982; UNAAMB, 2008).

4.5 Cartografía

Para la realización de los mapas temáticos de las propiedades físicas y químicas de los suelos se partió de la supuesta dependencia espacial de los datos, cuantificable en términos de la distancia y la dirección de separación de los mismos en cada uno de los sitios de muestreo. El método de interpolación utilizado en este trabajo fue el Kriging ordinario.

Para abarcar la totalidad de la cuenca en la interpolación de los mapas, se agregaron seis sitios fuera del área de estudio con valores promedio de los tres sitios más cercanos a cada punto, dando así un total de cincuenta y siete sitios. El análisis preliminar de los datos, así como la interpolación y los mapas de predicción se realizaron con el software ArcGIS 9.2.

4.5.1 Análisis exploratorio estadístico

Primero se determinó el tipo y la forma de la distribución de los datos mediante un histograma de frecuencias. Posteriormente, se obtuvieron los estadísticos básicos; a partir de dicha información se estableció si es necesario realizar alguna transformación a los datos para ajustarlos a la normalidad (Fig. 12).

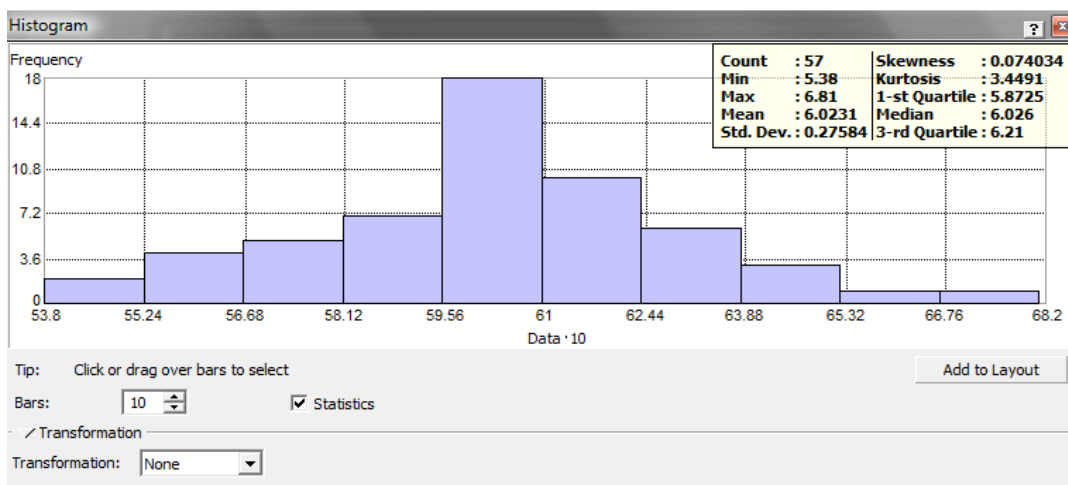


Fig. 12. Ejemplo del histograma de frecuencias y estadísticos básicos de los datos de pH (H₂O).

4.5.2 Modelación del Semivariograma

Primero se determinó el tipo de modelo teórico a ajustar al semivariograma experimental (Fig. 13), esto dependiendo de la distribución de los datos; después, se observó si existía anisotropía, en caso de presentarse, se definió la dirección y el ángulo de tolerancia de la búsqueda. Finalmente, apoyándose en la gráfica del semivariograma y el valor de la meseta (sill), se determinó el intervalo de la distancia (lag), así como el valor del efecto pepita (nugget). Se calculó el semivariograma empíricamente para el análisis de la continuidad espacial y conocer la variabilidad de los datos con respecto a la distancia, pudiendo así determinar el intervalo de distancia (lag) con relación a la meseta donde se estabiliza la gráfica que representa la función de semivarianza. Para conocer la diferencia de distancia entre pares de estaciones, se utilizó la ecuación 1 (Cañada, 2008; Montero y Larraz, 2008), donde X e Y son las coordenadas en metros, oeste y norte respectivamente, de la primera estación y Xi e Yi las coordenadas de la otra estación:

$$r_i = \sqrt{(X - X_i)^2 + (Y - Y_i)^2} \quad (1)$$

La obtención de la semivarianza de las variables de precipitación, entre pares de sitios, se obtuvo aplicando la ecuación 2 (Montero y Larraz, 2008). La función de semivarianza no se trabajó con agrupación de datos por distancias como se suele trabajar en la covarianza, sino con los datos individuales; esto, por cuanto no se tienen estudios antecedentes en la región que puedan orientar la organización de los datos.

$$SV = 1/2 N \sum (Z_{(x+h)} - Z_{(x)})^2 \quad (2)$$

Siendo SV la semivarianza, $Z_{(x)}$ es el valor en una primera estación y $Z_{(x+h)}$ es el valor en la segunda estación, la que está separada por un distancia h , y N corresponde al número de estaciones relacionadas.

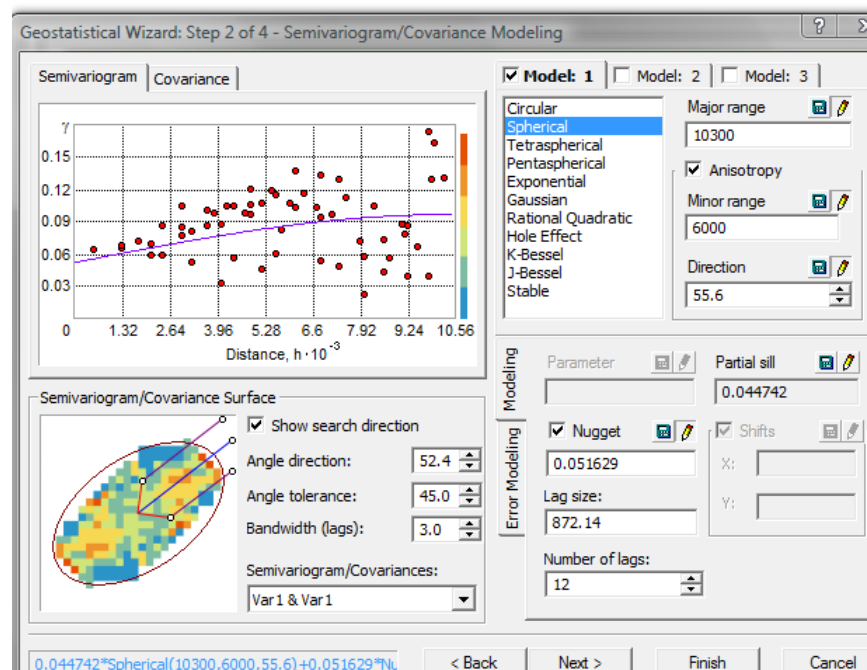


Fig. 13 Ejemplo de la modelación del semivariograma para los datos de pH(H2O).

4.5.3 Búsqueda de Vecindad

La búsqueda de vecinos se realizó partiendo de los resultados observados en el semivariograma. La búsqueda se puede realizar dividiendo el área en sectores orientados en la dirección encontrada de anisotropía (Fig. 14); el número de vecinos y sectores a tomar en cuenta, así como el peso asignado a cada uno de ellos, está en función a la distancia en la que se alcanza el valor de la meseta (sill).

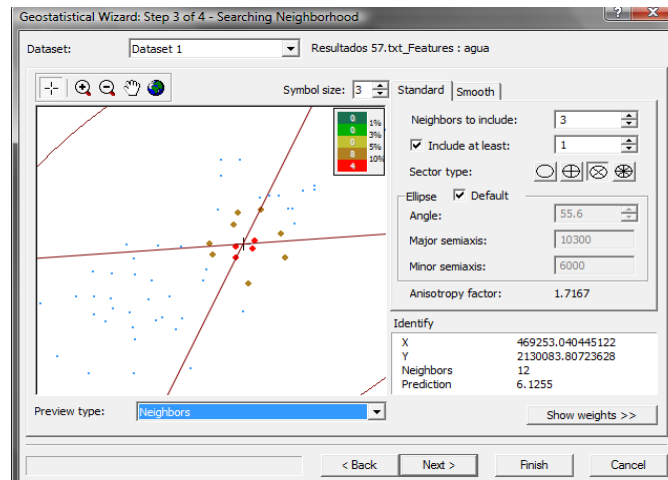


Fig. 14 Ejemplo de la búsqueda de vecindad para los datos de pH (H2O).

4.5.4 Validación Cruzada

Existen diferentes métodos para evaluar el ajuste del modelo de semivariograma elegido con respecto a los datos muestrales y, por ende, de las predicciones hechas con Kriging; el más empleado es el de validación cruzada, que consiste en excluir la observación de uno de los “n” puntos muestrales y, con los n-1 valores restantes y el modelo de semivariograma escogido, predecir vía Kriging el valor de la variable en estudio en la ubicación del punto que se excluyó. Se piensa que si el modelo de semivarianza elegido describe bien la estructura de autocorrelación espacial, entonces la diferencia entre el valor observado y el valor predicho debe ser pequeña. Este procedimiento se realiza en forma secuencial con cada uno de los puntos muestrales y así se obtiene un conjunto de n “errores de predicción”. A partir de estos datos se puede saber qué tanto se está sobreestimando o subestimando el fenómeno estudiado, así como la variabilidad de los datos obtenidos en la interpolación (Fig. 15).

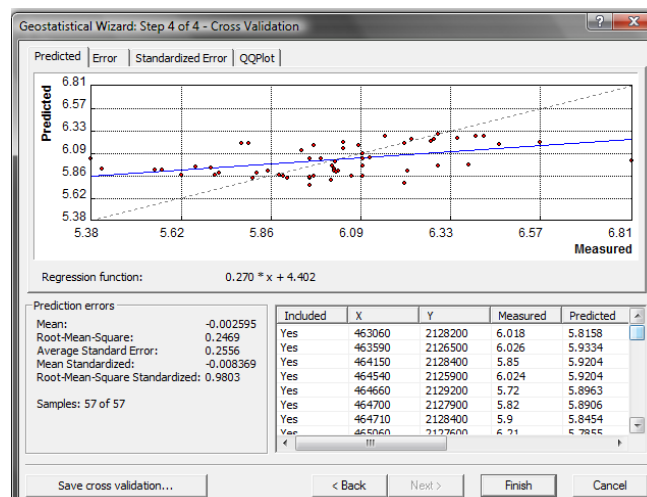


Fig. 15 Ejemplo de la validación cruzada para los datos de pH (H2O).

4.6 Análisis Estadístico

Las diferencias entre las distintas clases de las variables ambientales fueron determinadas mediante la prueba de ANOVA (análisis de varianza) de una vía, desempataando las diferencias entre las medias de las clases con la prueba de Fisher LSD (mínima diferencia significativa).

Las correlaciones entre las variables fueron obtenidas mediante el coeficiente de correlación de Spearman ρ (rho), el cual fue utilizado debido a que no supone que los datos están agrupados en una distribución normal; además de que no asume que la relación entre las variables es estrictamente lineal.

Todos los análisis estadísticos, incluyendo las pruebas de variancia, correlación y estadísticos básicos de los datos fueron realizados con el paquete STATISTICA v.7.0

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Análisis Geoestadístico

De manera general, los datos de las diferentes propiedades físico-químicas del suelo no se ajustaron a una distribución normal y, además, mostraron distintos grados de sesgo y curtosis. Resultados similares han sido obtenidos por diversos autores (Cahn *et al*, 1994; Cambardella *et al*, 1994; Kravchenko y Bullock, 1999; Kemmerer y Melchiori, 2004). En el caso de este estudio, el % de arenas, la MOS, el N total, el % de humedad, el P disponible, la densidad real, la densidad aparente y la conductividad eléctrica, presentaron una distribución no normal y fueron transformados para poder ajustarlos a la normalidad y así poder utilizarlos en la elaboración del semivariograma utilizado para cada uno de los mapas de predicción y error estándar de las variables (Cañada, 2008). Por otro lado, los datos del % de limos, arcillas, CIC, carbono orgánico total y pH, sí se distribuyeron normalmente; por lo tanto, no fue necesario el uso de transformaciones para la elaboración de su respectivo semivariograma.

Cuadro 11. Análisis espacial para variables edáficas, tipo de modelo y parámetros de los semivariogramas.

Variable	Unidades	Modelo	Anisotropía	Nugget	Meseta	Rango (m)	EEP	ECME
Arenas	%	Esférico	No	1.80	11.80	2356.5	8.25	0.993
Limos	%	Esférico	No	20.55	13.01	2597.4	5.43	0.952
Arcillas	%	Esférico	No	22.62	9.40	1671.4	4.99	0.963
D.R.	g/cm ³	Esférico	No	2.52	16.41	9337.7	0.15	0.974
D.A.	g/cm ³	Circular	No	4.30	10.20	427.0	0.09	0.995
H	%	Esférico	Si	1.04	12.50	1033.7	15.90	1.050
pH	-log[H ⁺]	Esférico	Si	4.35	11.20	1030.0	0.25	0.980
C.E.	m/S	Esférico	Si	1.87	3.98	1033.7	1.00	0.965
P	mg/Kg	Circular	No	1.73	3.80	875.5	9.39	1.042
MOS	%	Esférico	No	3.90	10.25	7337.7	3.62	0.965
COT	%	Esférico	No	3.55	7.55	1033.7	2.10	0.961
NT	%	Esférico	Si	0.02	0.05	1034.4	0.15	0.901
CIC	cmol/Kg	Esférico	Si	4.50	9.25	1030.0	1.39	1.003
Sodio	cmol/Kg	Esférico	No	0.68	0.85	1567.0	0.03	0.926
Potasio	cmol/Kg	Esférico	No	1.72	2.43	1284.7	0.26	1.083
Calcio	cmol/Kg	Esférico	No	0.80	1.72	1033.7	1.45	1.002
Magnesio	cmol/Kg	Esférico	No	0.50	0.78	330.56	0.29	1.014

d.r: densidad real; d.a: densidad aparente; H: humedad; c.e: conductividad eléctrica; P: fósforo; MOS: Materia orgánica del suelo; COT: Carbono orgánico total; NT: Nitrógeno total; CIC: Capacidad de intercambio catiónico. EEP: Error estándar de la predicción; ECME: Error cuadrático medio estandarizado.

Con respecto al cálculo de los semivariogramas experimentales, se probaron diferentes modelos para ver cuál es el que más se ajustaba a los diferentes fenómenos de estudio; sólo se utilizaron dos modelos: el circular y el esférico; el primero se utilizó en el mapa de MOS y de densidad aparente, y el segundo para los mapas restantes (Cuadro 11). Los semivariogramas mostraron correlación espacial en casi todas las variables de estudio (Anexo I); dicha correlación se determinó dado que la semivarianza no es constante en función de la distancia (Giraldo *et al*, 2000). La relación C/N mostró nula dependencia espacial, lo cual puede indicar que la distancia entre los sitios de muestreo no fue la apropiada (fue demasiado grande y no captó la variación

espacial); por tal motivo, se decidió no realizar el mapa correspondiente (Sommer *et al*, 2000). Las variables analizadas mostraron diferentes rangos de dependencia espacial, lo que dificultaría la determinación de un único espaciamiento óptimo de muestreo, requiriendo protocolos especiales según la variable en cuestión (Giraldo *et al*, 2000; Kemerer y Melchiori, 2004). En todos los casos, como se esperaba, el efecto *nugget* está presente. Ello puede ser explicado por la falta de información en distancias más cortas a la mínima disponible (Palacio *et al*, 1994).

La validación de los semivariogramas se realizó mediante la validación cruzada, en concreto se utilizó el error estándar de la predicción (EEP) y el error cuadrático medio estandarizado (ECME); el primero evalúa la variabilidad de las predicciones mediante la premisa de que los valores predichos deben estar lo más cerca posible de los valores observados, y el segundo determina si se está subestimando o infraestimando la variabilidad de las predicciones (Cañada, 2008). Estos parámetros han sido utilizados en otros trabajos obteniendo buenos resultados (Ayoubi *et al*, 2007; Henríquez *et al*, 2005; Santra *et al*, 2008; Sommer *et al*, 2000; Villatoro *et al*, 2008). Los errores de la interpolación en general fueron bajos, el EEP se mantuvo en valores relativamente pequeños en proporción a las unidades en las que se midieron las variables, las diferencias más grandes las presentaron el P disponible (9.39), el % de humedad (15.90) y el % de arenas (8.25), lo puede explicarse por una alta variabilidad en los datos de estos parámetros, lo cual provoca una mayor diferencia entre los datos medidos y los estimados (Giraldo *et al*, 2000); Las variables que presentaron un menor EEP fueron el contenido de sodio (0.03), la densidad aparente (0.09) y la densidad real (0.15), tal comportamiento podría explicarse por la escala en la que son medidas estas propiedades, además de su poca variación en los datos obtenidos de los sitios de muestreo (Giraldo *et al*, 2000; Villatoro *et al*, 2008). Respecto al ECME, las diferencias entre las propiedades fueron mínimas ya que para todas las variables el ECME estuvo cercano a 1, lo cual indica una buena predicción (Cañada, 2008). Se observó que la mayoría de las propiedades medidas se encontraron por debajo de 1, lo cual indica que la variabilidad de la predicción se está sobreestimando; solo se observaron ECME por arriba de 1 en los casos de % de humedad, Fósforo, CIC, Potasio, Calcio y Magnesio, lo que indica que la variabilidad en la interpolación se está infraestimando (Cañada, 2008; Santra; 2008).

Además de utilizar la validación cruzada y los errores de la predicción, se realizaron mapas del error estándar de la predicción para cada variable (Anexo III), con el objeto de poder identificar espacialmente las zonas con mayor incertidumbre en la interpolación. De manera general, las áreas con mayor precisión se ubicaron en el centro de la CRM y, por el contrario, las zonas con mayor error se ubicaron en los extremos, lo que se debe a una menor cantidad de puntos de muestreo en las zonas límite del área de estudio (Brus *et al*, 1996; Sommer *et al*, 2000). A pesar de que se agregaron seis sitios de muestreo extra para que la interpolación cubriera la totalidad de la CRM, se observó de manera constante un mayor error en la zona Noreste y Sureste, claramente debido a la falta de puntos de muestreo en dichas áreas.

5.2 Propiedades Físicas

5.2.1 Textura

Como era de esperarse en lo suelos de tipo andosol la textura es generalmente gruesa (Zehetner y Miller, 2006); Los promedios obtenidos de los sitios muestran dos clases texturales en la zona de estudio, *franco arenosa* y *franco arcillo arenosa*, manifestando una predominancia de las *arenas* (62.8%) en el promedio

general de los sitios sobre el resto de las clases texturales; *limos* (17.4%) y *arcillas* (19.5%) (Cuadro 12). La clase textural en andosoles depende frecuentemente del grado de intemperización del material parental (Shoji *et al*, 1993). La proporción de arcillas cristalinas en el suelo fue mucho menor en comparación con las arenas y muy parecida a la de los limos, lo cual indica que los suelos en el área de estudio están menos intemperizados, son jóvenes y ricos en minerales meteorizables, lo que asegura una liberación gradual de nutrientes al suelo (Yimer *et al*, 2006). Sería conveniente estudiar la proporción de arcillas conforme aumenta la profundidad del suelo para poder identificar cambios a diferentes profundidades, los cuales han sido reportados para mismos tipos de suelos cerca del área de estudio (Prado *et al*, 2007) y así entender mejor la evolución de los suelos de la CRM.

Cuadro 12. Promedios de textura y las diferentes fracciones con su error estándar para cada una de las variables ambientales.

Vegetación	N=	Clase	Arenas (%)	Limos (%)	Arcillas (%)
<i>Abies religiosa</i>	19	Franco arenosa	65.0 ± 2.3	16.9 ± 1.5	17.4 ± 1.2 b
<i>Abies religiosa-Pinus hartwegii</i>	8	Franco arenosa	64.6 ± 3.4	16.5 ± 1.4	19.3 ± 1.8 a
<i>Pinus hartwegii</i>	16	Franco arcillo arenosa	58.7 ± 0.9	19.0 ± 0.9	22.3 ± 0.7 b
<i>Pinus hartwegii-Abies religiosa</i>	8	Franco arcillo arenosa	62.8 ± 3.0	16.0 ± 2.0	21.1 ± 1.6 a
Altitud (msnm)					
2500 - 3000	12	Franco arenosa	66.6 ± 3.2	14.5 ± 1.5	17.4 ± 1.8 a
3000 - 3400	11	Franco arenosa	65.8 ± 3.6	17.6 ± 2.2	16.8 ± 1.6 a
3400 - 3800	28	Franco arcillo arenosa	60.0 ± 1.1	18.4 ± 0.9	21.5 ± 0.6 b
Orientación					
Norte	9	Franco arenosa	63.1 ± 2.9	16.6 ± 1.6	20.3 ± 1.5
Noreste	6	Franco arenosa	62.7 ± 3.1	19.2 ± 2.7	17.2 ± 1.8
Este	9	Franco arcillo arenosa	58.3 ± 2.2	18.0 ± 1.6	23.2 ± 1.6
Sureste	8	Franco arenosa	62.6 ± 4.0	18.6 ± 2.7	19.3 ± 2.0
Sur	5	Franco arcillo arenosa	58.8 ± 1.4	20.1 ± 0.8	21.0 ± 1.2
Oeste	6	Franco arenosa	64.5 ± 3.3	16.3 ± 2.1	18.3 ± 2.0
Noroeste	8	Franco arenosa	68.6 ± 3.8	15.0 ± 2.0	16.6 ± 1.7
Suma		Franco arenosa	62.8 ± 1.3	17.4 ± 0.8	19.5 ± 0.7

*Letras diferentes (**a**, **b**) entre las filas denotan diferencias significativas al $P < 0.05$, Fisher's LSD.

Respecto a las variables ambientales, la textura de los sitios en las tres clases altitudinales (alta, media y baja) presenta diferencias significativas en el porcentaje de arcilla ($p= 0.008$), así como algunas tendencias en las dos fracciones restantes. En promedio, el mayor porcentaje de arenas se observa en la clase baja (66.6%) y el menor en la clase alta (60.0%); no se observan diferencias significativas entre las tres clases, a pesar de ello el porcentaje de arenas muestra una tendencia a ser diferente de acuerdo con la altitud ($p= 0.058$). El promedio del porcentaje de limos es mayor en la parte alta (18.4%) y menor en la parte baja (14.5%) y no se presentan diferencias significativas entre las clases altitudinales, sin embargo, se observa una ligera tendencia a aumentar con la altitud. El promedio del porcentaje de arcillas es significativamente mayor en la clase alta (21.5%), comparado con el de a la clase media (16.8%) y la clase baja (17.4%). Relaciones de las clases texturales y la altitud han sido reportadas anteriormente (Zehetner y Miller, 2006) para el mismo tipo de suelo, donde se ha encontrado que las arcillas tienen una relación positiva con la altitud y las arenas una relación negativa, explicada por el hecho de que a mayor altitud se presenta un ambiente de intemperismo mucho más intenso, lo que posiblemente favorece la formación de arcillas. Los elevados contenidos de arenas en la CRM pueden comprometer la capacidad del suelo para almacenar agua y diversos nutrientes, y puede hacerlos

propensos a una elevada pérdida de iones de intercambio móviles (Shoji *et al*, 1993). Por el contrario, el contenido de arcillas es de gran relevancia para el suelo debido a su elevada superficie de contacto que beneficia la adsorción de nutrientes; en el caso de los andosoles su contenido es de gran importancia debido a su estrecha relación con los alófanos^h, los cuales presentan una gran cantidad de Al y Fe activos, mismos que juegan un papel muy importante en las propiedades químicas del suelo (Shoji *et al*, 1993; Van Ranst *et al*, 2004).

En cuanto a las clases de vegetación asociadas con las fracciones texturales, el promedio de los sitios muestra diferencias significativas en el porcentaje de arcilla ($p= 0.029$), así como una ligera tendencia en el porcentaje de arenas. Particularmente, el mayor porcentaje de arenas se observa en la clase conformada por *A. religiosa* (65.0%), asimismo el menor porcentaje se presenta en la clase compuesta por *P. hartwegii* (58.7%), no se encuentran diferencias significativas entre las clases de vegetación, pese a lo cual se observa una tendencia a disminuir en las clases en donde sólo la especie de *A. religiosa* está presente, y a aumentar en donde está ausente. Respecto a los limos, no se observan diferencias significativas de acuerdo con tipo de vegetación; en concreto, el porcentaje más alto se presentó en la clase de *P. Hartwegii* (19.0%) y el más bajo en la clase de la asociación formada por *P. Hartwegii* y *A. religiosa* (16.0%). El promedio del porcentaje de arcillas es significativamente mayor en la clase de *P. Hartwegii* (22.3%) en comparación con la clase de *A. religiosa* (17.4%), observándose una tendencia de las arcillas a aumentar en las clases donde el *P. hartwegii* está presente y a disminuir en donde está ausente (Cuadro 12). De esta manera, las variaciones en el promedio del porcentaje de arcillas y arenas determinan la textura franco arenosa para las clases formadas por *A. religiosa*, y franco arcillo arenosa para las clases compuestas por *P. hartwegii*. CONAFOR (2006) indica en las fichas técnicas para la reforestación la clase textural óptima para cada tipo de planta; en el caso del *A. religiosa*, la recomendada es limo arenosa, arcillo arenosa o arenosa, y para el *P. hartwegii*, franco arenosa; en general, se observa que la clase textural reportada en el presente estudio es más arenosa a la recomendada para cada una de las especies vegetales. Jujnovsky (2006) reporta para la CRM clases texturales del tipo franca, franca arcillosa y franca arenosa, mismas que son parecidas a las reportadas en este trabajo; las diferencias se pueden atribuir a las diferencias en la profundidad y número de sitios de muestreo.

La orientación de la pendiente en el área de estudio, no muestra diferencias significativas entre las siete clases; específicamente, el promedio del porcentaje de arenas es mayor para las orientaciones Oeste (64.5%) y Noroeste (68.6%), y menor para las orientaciones Sur (58.8%) y Este (58.3%). En el caso del porcentaje de limos, el mayor se observa en las orientaciones Sur (20.1%) y Noreste (19.2%) y el menor en las orientaciones Norte (16.6%) y Oeste (16.3%). El promedio del porcentaje de arcillas se comporta de manera contraria al del porcentaje de arenas, siendo mayor en las orientaciones Sur (21.0%) y Este (23.2%), y menores en las orientaciones Noreste (17.2%) y Noroeste (16.6%). Estas variaciones en el porcentaje de arcilla determinan que la clase textural para las orientaciones Sur y Este sea franco arcillo arenosa, y franco arenosa en el resto de las clases. Yimer *et al* (2006) observaron diferencias significativas entre las diferentes clases texturales y la orientación de la pendiente; sin embargo lo hicieron en un área de estudio mucho más grande, y utilizaron un muestreo enfocado en transectos a lo largo de las diferentes orientaciones. Deben llevarse a cabo estudios más

^h Los alófanos se forman de los materiales de la ceniza volcánica y son componentes importantes de los suelos de derivación volcánica, aunque pueden también ser encontrados en la fracción de la arcilla de muchos suelos no-volcánicos. Los suelos volcánicos que contienen alófanos generalmente contienen una cantidad significativa de materia orgánica y tienen una baja densidad (Brady, 1996)

detallados acerca de las diferencias entre pendientes y orientaciones para poder descartar una influencia sobre las propiedades del suelo en la CRM.

5.2.1 Mapas de distribución

Los mapas de las fracciones del suelo reflejan de manera general la composición de la textura en la CRM, con una marcada predominancia de las arenas sobre los limos y las arcillas. En concreto, el mapa de arenas (Fig. 16) muestra un intervalo de 55-75%, ubicando el mayor contenido de arenas en la zona media de la cuenca, la distribución se muestra homogénea en la mayor parte del área de estudio; sin embargo, se observa un comportamiento extraño en la interpolación ya que la zona con mayor contenido de arenas se limita a un área circular relativamente pequeña, sin embargo, los errores (tanto el EEP como el ECME) se encuentran dentro de lo permitido (Giraldo, 2000), y el mapa del error estándar de la predicción (Anexo III. A) muestra un área muy pequeña de incertidumbre en las zonas límites de la cuenca: Si se observa el semivariograma (Anexo I.A) se puede observar cómo, en general, las variaciones en el contenido de arenas se dan en distancias cortas y después se estabilizan.

El mapa de limos muestra un contenido bastante homogéneo, con un intervalo de 8 a 24%; los mayores contenidos se encuentran en la parte Norte de la cuenca, en donde de manera general, se observan los mayores porcentajes de limos en la parte alta, aunque no se observa una correlación directa con alguna de las variables ambientales del estudio. El mapa de errores de la predicción (Anexo III.A), muestra que las zonas con mayor incertidumbre se encuentran en los límites de la cuenca y la parte baja de la misma.

Respecto al mapa de arcillas se observa un gradiente en dirección Noreste-Suroeste el cual coincide de manera general con el gradiente altitudinal, presentándose un intervalo de 8-25% en el contenido de arcillas, ubicando el mayor contenido en la parte alta y el menor en la parte baja de la cuenca. El semivariograma obtenido a partir del análisis geoestadístico muestra una alta correlación espacial entre los sitios lo que refleja una buena interpolación (Giraldo, 2000), el mapa de errores de la predicción (Anexo III.A) indica muy poca incertidumbre en la mayor parte de la CRM, observándose los mayores errores en las parte Noreste y Sureste de la cuenca lo que se explica principalmente a una menor cantidad de puntos de muestreo en esas zonas.

5.2.2 Densidad real y aparente

Los promedios de la densidad real y aparente no varían de manera significativa con respecto a las diferentes variables ambientales. El promedio para la CRM de la densidad real es de 1.61 g/cm^3 ; se sabe que la densidad real depende de la composición química del material parental y de la estructura de la fracción mineral del suelo; valores por debajo de 2.0 g/cm^3 son característicos de andosoles ricos en humus y con baja cantidad de minerales ferromagnesianos (Acevedo-Sandoval *et al*, 2008; Shoji *et al*, 1993). Para el caso de la densidad aparente el promedio es de 0.74 g/cm^3 ; valores menores a 0.9 g/cm^3 son característicos de suelos derivados de materiales volcánicos moderadamente intemperizados, con altos contenidos de alófanos ricos en humus y baja cantidad de arcillas (Yimer *et al*, 2006; Shoji *et al*, 1993).

En el caso de la altitud, los promedios de la densidad real muestran una ligera tendencia ($p= 0.072$) a disminuir en función de la altitud (Cuadro 13), notando un promedio mayor en la clase más baja (1.67g/cm^3) y uno

Porcentaje de arenas del horizonte superficial en la cuenca del río Magdalena

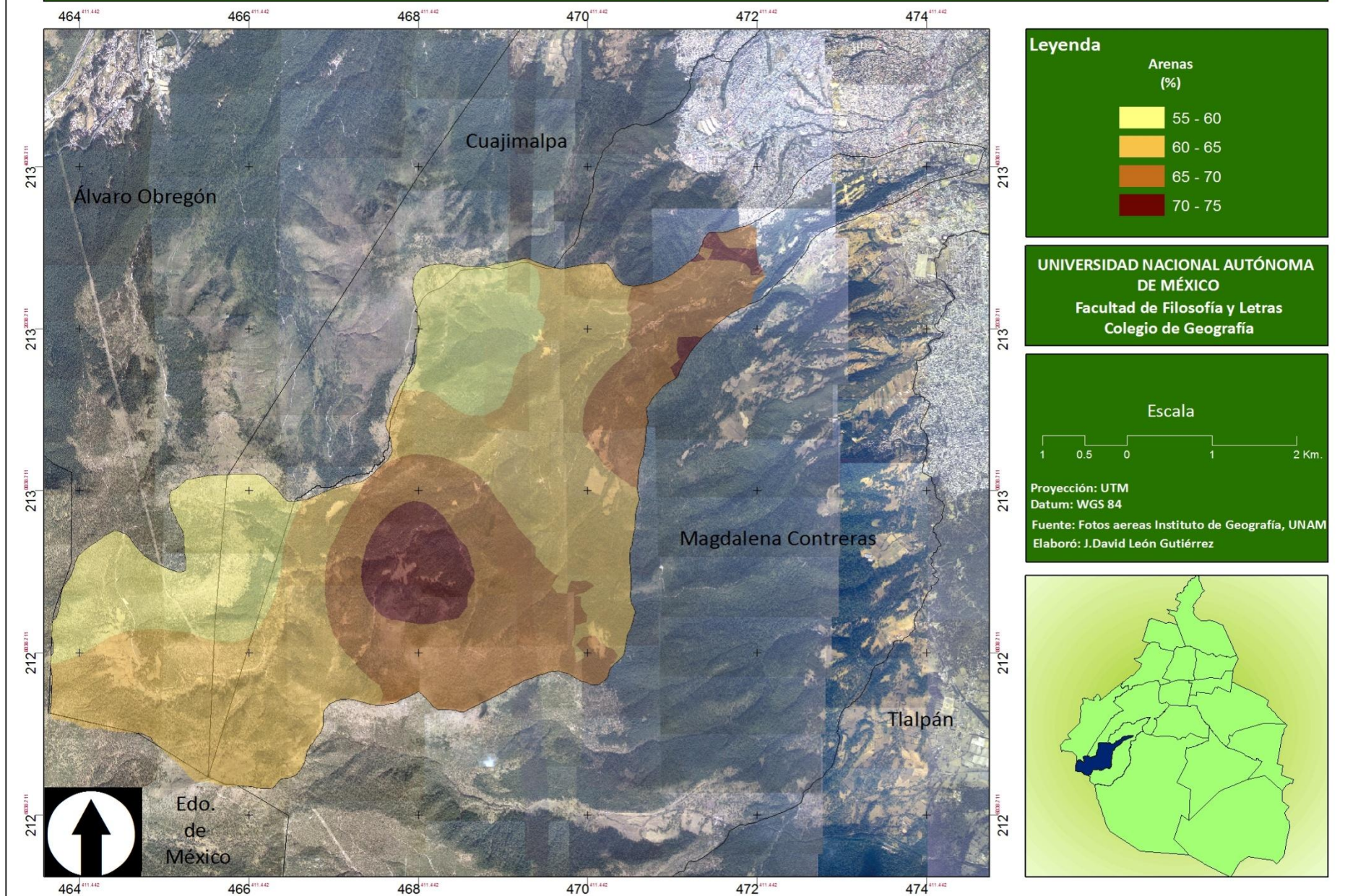


Fig. 16 Mapa de porcentaje de arenas del horizonte superficial en la cuenca del río Magdalena.

Porcentaje de limos del horizonte superficial en la cuenca del río Magdalena

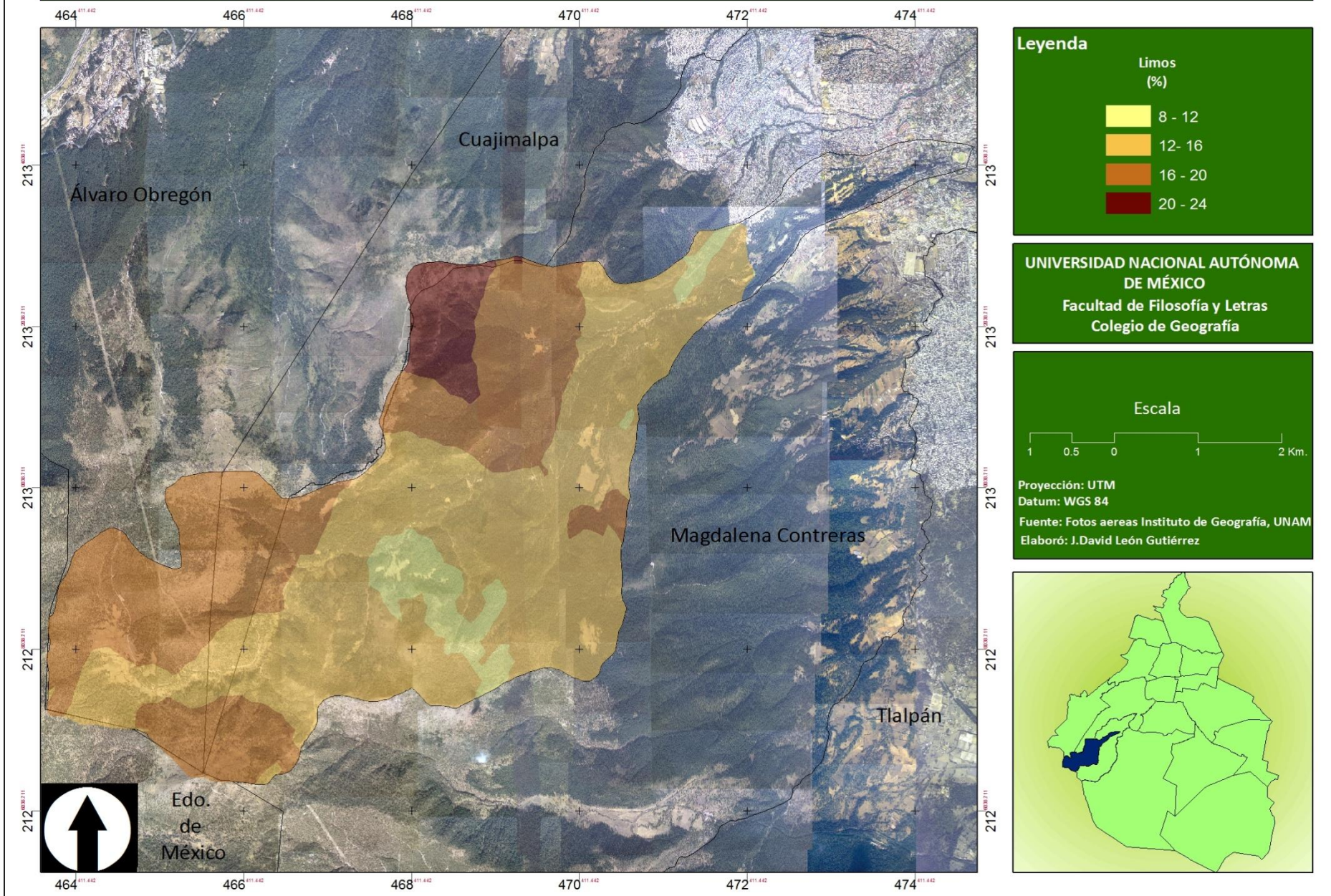


Fig. 17 Mapa de porcentaje de limos del horizonte superficial en la cuenca del río Magdalena.

Porcentaje de arcillas del horizonte superficial en la cuenca del río Magdalena

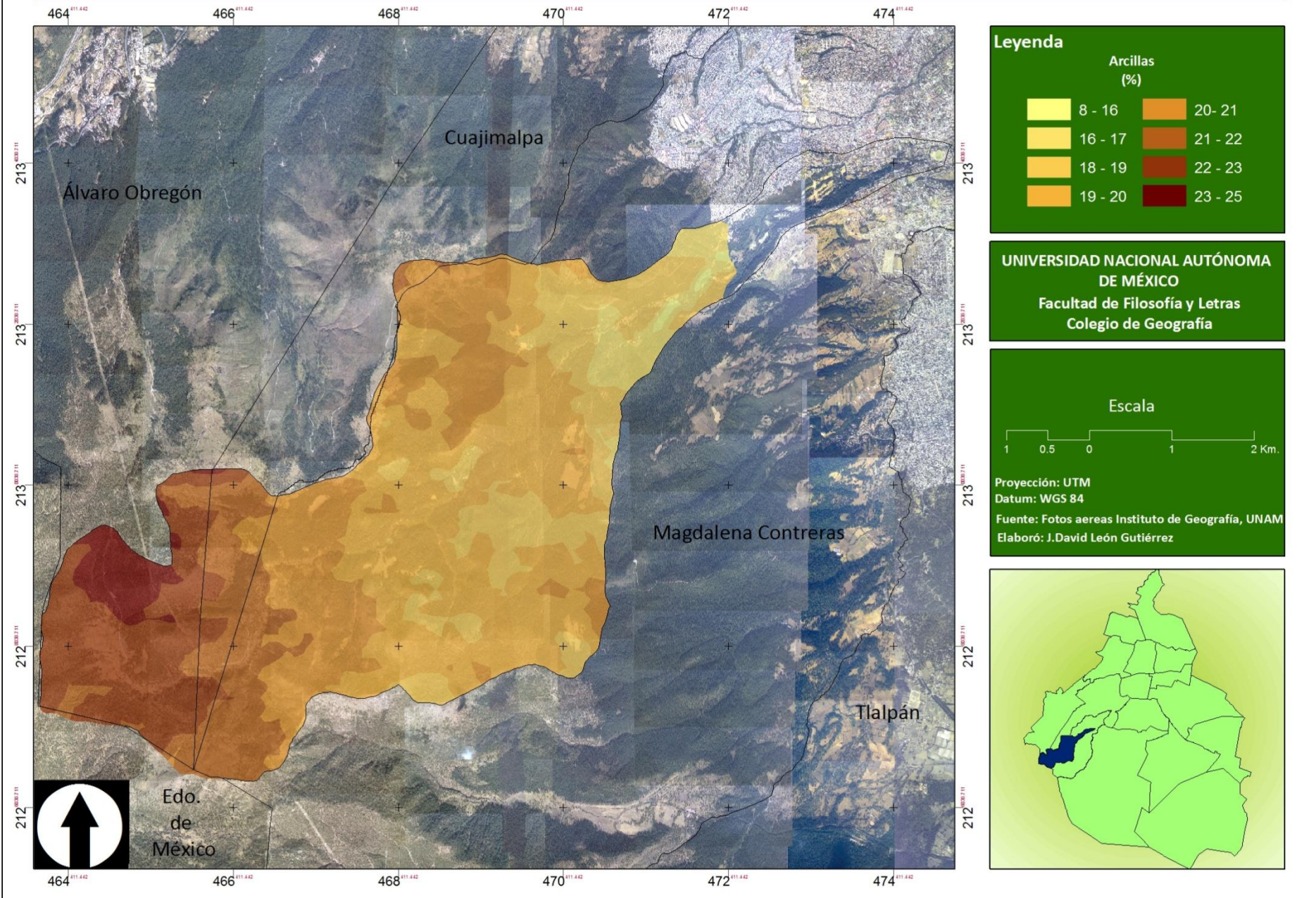


Fig. 18 Mapa de porcentaje de arcillas del horizonte superficial en la cuenca del río Magdalena.

menor en la más alta (1.58g/cm³). Los promedios de la densidad aparente presentan una mínima variación en las tres diferentes clases de altitud (Cuadro 13), observándose el mayor valor en la clase más alta (0.75g/cm³) y el menor en la clase más alta (0.73g/cm³). Una posible relación positiva entre la altitud y la densidad real podría ser explicada debido a la relación inversa entre la altitud y el aumento de la fracción de arcillas, ya que en suelos con alto contenido de materia orgánica se esperan valores bajos de densidad real. Respecto a la densidad aparente, el hecho de que no se observen diferencias claras en las clases de altitud fue inesperado ya que en diversos trabajos se ha reportado dicha relación (Griffiths *et al*, 2009; Seibert *et al*, 2007; Tsui *et al*, 2004), debido a que ésta se asocia con la cantidad de MOS y de arcillas (Brady y Weil, 1996).

Cuadro 13. Promedios de la densidad real y aparente con su error estándar para cada una de las variables ambientales.

Vegetación	N=	D.R (g/cm³)	D.A. (g/cm³)
<i>Abies religiosa</i>	19	1.70 ± 0.03	0.73 ± 0.01
<i>Abies religiosa-Pinus hartwegii</i>	8	1.58 ± 0.08	0.75 ± 0.04
<i>Pinus hartwegii</i>	16	1.55 ± 0.02	0.75 ± 0.02
<i>Pinus hartwegii-Abies religiosa</i>	8	1.61 ± 0.02	0.72 ± 0.02
Altitud (msnm)			
2500 – 3000	12	1.67 ± 0.04	0.73 ± 0.02
3000 – 3400	11	1.68 ± 0.06	0.72 ± 0.02
3400 – 3800	28	1.58 ± 0.02	0.75 ± 0.01
Orientación			
Norte	9	1.57 ± 0.03	0.72 ± 0.02
Noreste	6	1.70 ± 0.06	0.79 ± 0.03
Este	9	1.52 ± 0.04	0.74 ± 0.01
Sureste	8	1.61 ± 0.07	0.70 ± 0.03
Sur	5	1.73 ± 0.08	0.77 ± 0.03
Oeste	6	1.60 ± 0.03	0.75 ± 0.05
Noroeste	8	1.65 ± 0.06	0.73 ± 0.03
Suma		1.61 ± 0.02	0.74 ± 0.01

*Letras diferentes entre las filas denotan diferencias significativas al P <0.05, Fisher's LSD.. D.R: Densidad real, D.A: Densidad aparente.

En cuanto al tipo de vegetación, los promedios de la densidad real muestran poca variación entre las clases (cuadro 13), observando un mayor valor en la clase de *A. religiosa* (1.70g/cm³) y un valor menor en la clase de *P. hartwegii* (1.55g/cm³); no existen diferencias significativas entre las clases de vegetación. Los promedios de la densidad aparente son muy homogéneos, por lo tanto, no se encuentran diferencias significativas en la vegetación, el promedio mayor lo comparten las clases de *P. hartwegii* y *A. religiosa – P. hartwegii* (0.75g/cm³), y el promedio menor pertenece a la clase de *P. hartwegii – A. religiosa* (0.72g/cm³). Se encontraron pocas variaciones respecto a la densidad entre los tipos de vegetación; la densidad real fue la que mostró mayor variación atribuida principalmente al contenido de partículas finas, la MOS y su relación con la vegetación; sin embargo a pesar de que la densidad aparente también está estrechamente relacionada con la MOS no se observaron claras diferencias, lo que podría atribuirse a que la densidad aparente en la CRM se relaciona más estrechamente con el tipo de textura, misma que presenta poca variación.

Los promedios de la densidad real y aparente respecto a la orientación no muestran diferencias significativas entre las siete clases, a pesar de que los promedios de la densidad real presentan algunas variaciones entre las clases; los promedios mayores se encuentran en las orientaciones Sur (1.73g/cm^3) y Noreste (1.70g/cm^3), y los menores, en las orientaciones Este (1.52g/cm^3) y Norte (1.57g/cm^3). La densidad aparente una vez más muestra mínima variación, encontrando los promedios mayores para las orientaciones Noreste (0.79g/cm^3) y Sur (0.77g/cm^3), y los menores en el Sureste (0.70g/cm^3) y Norte (0.72g/cm^3).

5.2.2 Mapas de distribución

En el mapa de predicción de la densidad real (Fig. 19) se observan en general valores homogéneos, presentándose en mayor área los intervalos correspondientes a $1.4\text{-}1.6\text{g/cm}^3$ y a $1.6\text{-}1.8\text{g/cm}^3$, advirtiéndose una relación negativa con la altitud, los errores de la predicción (Anexo II.A) se encuentran dentro de las tolerancias aceptadas, y el mapa de errores muestra que las áreas con mayor error se encuentran en la zona Sur y Noreste, correspondiendo a las áreas con menor intensidad de muestreo; por el contrario, la parte alta de la CRM fue la que se representó con mayor exactitud.

En cuanto al mapa de predicción de la densidad aparente (Fig.20) sólo muestra tres zonas dentro de la CRM, lo que indica poca variabilidad en los datos, esto se refleja en el semivariograma (Anexo I.B) donde se observa una débil correlación espacial lo que indica que la distancia en el muestreo no fue la más adecuada. De manera general, se observa un área que abarca más de la mitad de la CRM que tiene una densidad real en un rango de $0.70\text{-}0.75\text{ g/cm}^3$, destacando que en las partes de mayor altitud se observa una menor densidad real. El mapa de errores de la predicción (Anexo III.A) muestra una incertidumbre en general en toda la cuenca, especialmente en las zonas altas, seguramente derivado de la inadecuada distancia en el muestreo o la poca variabilidad de los datos.

5.2.3 Porcentaje de porosidad

Los promedios del porcentaje de porosidad del horizonte superficial expresan poca variación entre las diferentes clases ambientales, siendo estos muy homogéneos (Cuadro 14). El % de porosidad promedio para la CRM (53.2) es el reportado para suelos arenosos superficiales e indica poca retención de agua así como una buena aireación, drenaje y resistencia a la erosión hídrica; la mayor presencia de macroporos va a estar determinada por una mayor presencia de arenas y la de microporos por la de arcillas (Brady y Weil, 1996; Shoji *et al*, 1993).

En el caso de la altitud el mayor promedio (55.9%) se presenta en la clase baja y el menor (51.1%) en la clase alta, no se encontraron diferencias significativas entre los promedios de las clases. Lo que se explica en mayor parte al hecho de que el % de porosidad está directamente en función de la densidad real y aparente, y al notarse poca variación en éstas el % de porosidad tampoco muestra variación.

En cuanto a las clases de vegetación, los promedios son muy similares; por consiguiente, no se encuentran diferencias significativas entre los distintos tipos de vegetación; el promedio mayor se observa en la clase de *A. religiosa* (53.3%) y el menor los comparten las clases de *P. hartwegii* y *A. religiosa* – *P. hartwegii*(51.2%).

Densidad real del horizonte superficial en la cuenca del río Magdalena

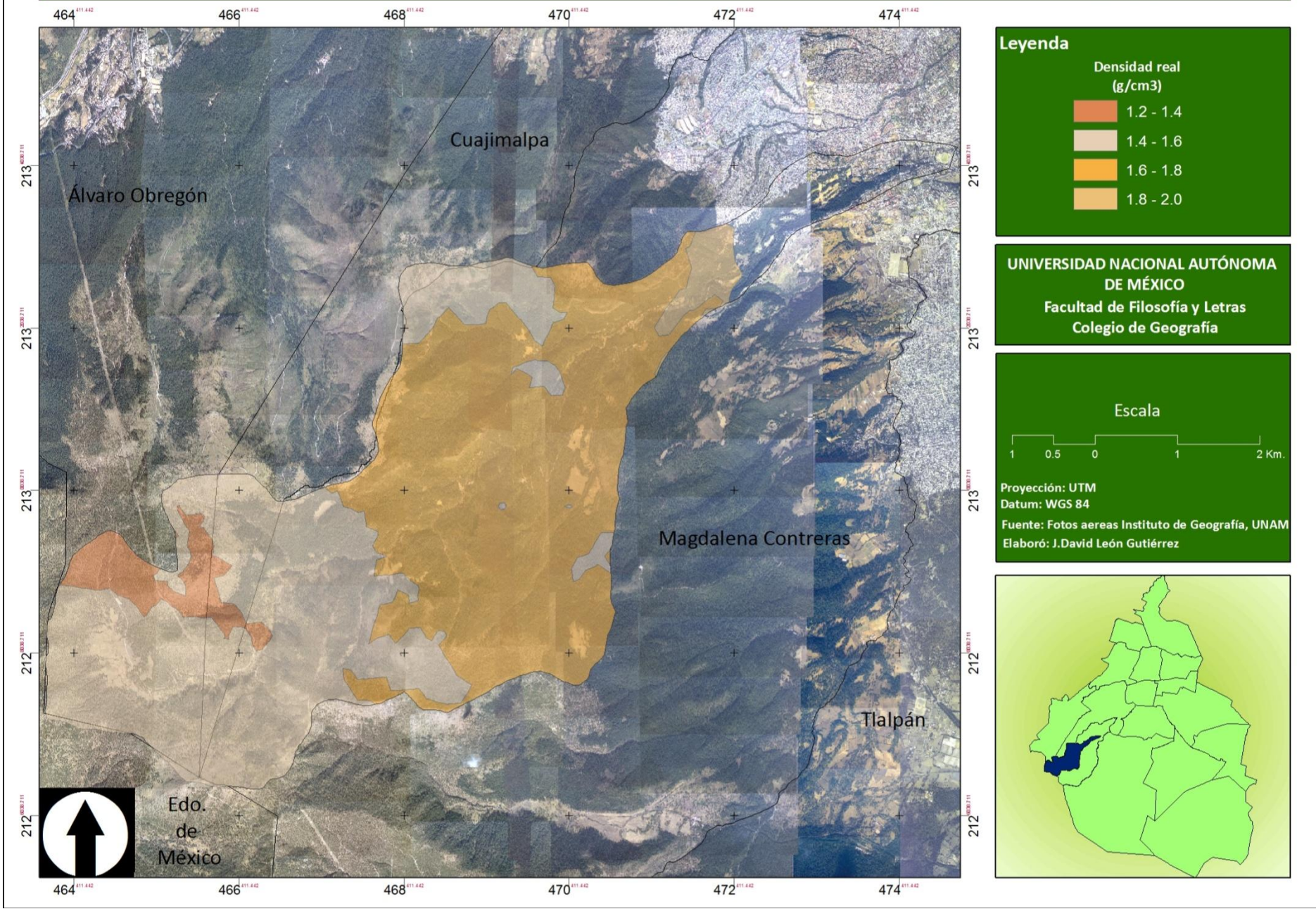


Fig. 19 Mapa de densidad real del horizonte superficial en la cuenca del río Magdalena.

Densidad aparente del horizonte superficial en la cuenca del río Magdalena

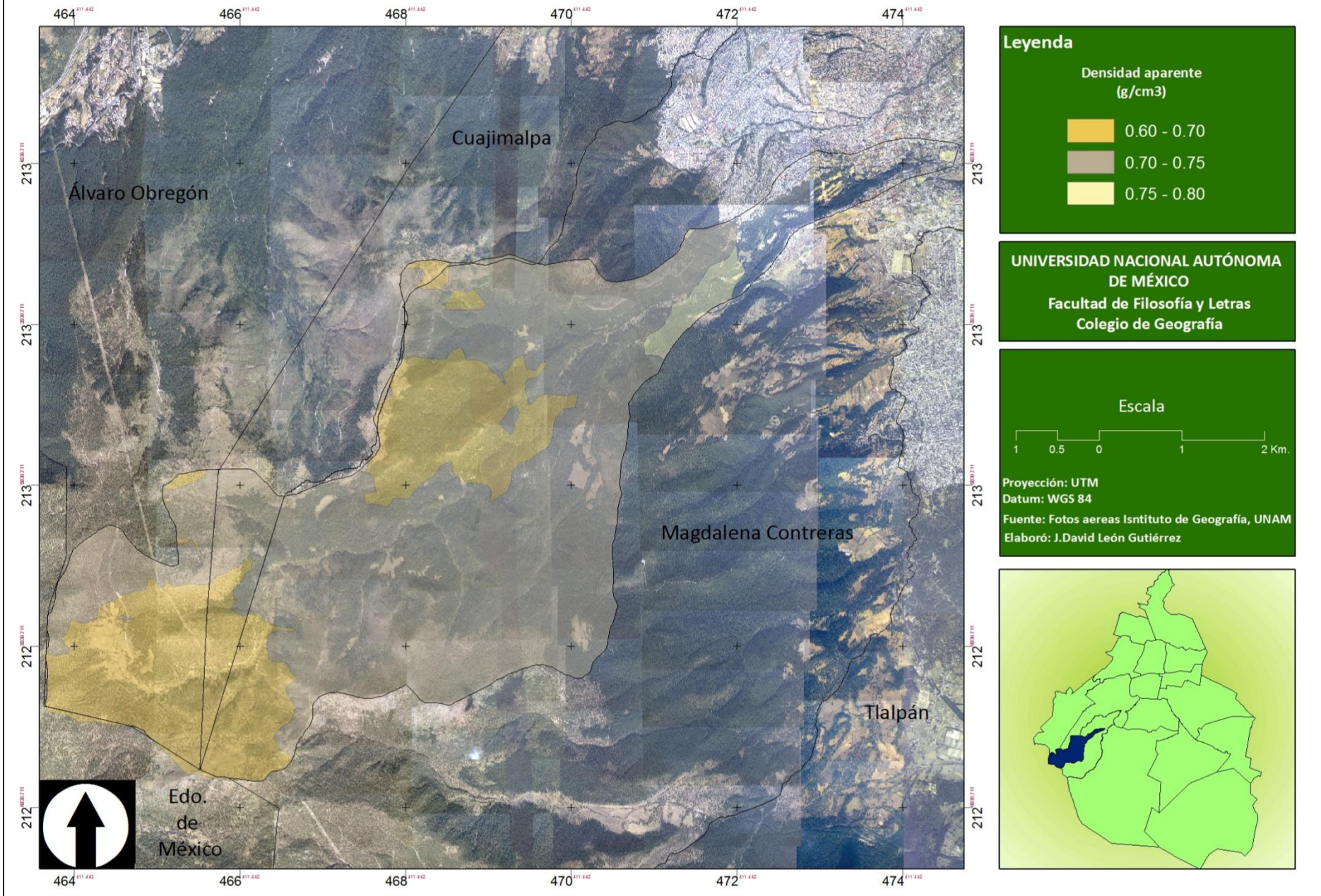


Fig. 20 Mapa de densidad aparente del horizonte superficial en la cuenca del río Magdalena.

Cuadro 14. Promedios del porcentaje de porosidad con su error estándar para cada una de las variables ambientales.

Vegetación	N=	Porosidad (%)
<i>Abies religiosa</i>	19	55.3 ± 1.2
<i>Abies religiosa-Pinus hartwegii</i>	8	51.2 ± 2.9
<i>Pinus hartwegii</i>	16	51.2 ± 1.5
<i>Pinus hartwegii-Abies religiosa</i>	8	53.1 ± 2.8
Altitud (msnm)		
2500 - 3000	12	55.9 ± 1.5
3000 - 3400	11	55.5 ± 2.2
3400 - 3800	28	51.1 ± 1.1
Orientación		
Norte	9	52.6 ± 1.9
Noreste	6	52.7 ± 3.7
Este	9	50.1 ± 1.4
Sureste	8	55.6 ± 2.5
Sur	5	54.0 ± 1.7
Oeste	6	52.0 ± 4.0
Noroeste	8	55.0 ± 1.6
Suma		53.2 ± 0.9

En el caso de la orientación de la pendiente, los promedios mayores se observan en las orientaciones Sureste (55.6%) y Sur (54.0%), y los menores en las orientaciones Este (50.1%) y Oeste (52.0%); no se presentan diferencias significativas entre las diferentes clases.

5.2.4 Porcentaje de humedad

Los promedios del porcentaje de humedad muestran variaciones con respecto a las diferentes variables ambientales (Cuadro 15). En concreto, la altitud muestra diferencias significativas entre sus clases ($p= 0.029$), específicamente entre la clase baja (45.0%) y la clase alta (58.9%), mostrando así un incremento en la humedad en función de la altitud. En general estos resultados concuerdan con los mapas reportados por Galeana (2008), donde se observa que la precipitación en la CRM obedece a un gradiente que va de los 1000 a los 1200 mm anuales en dirección Noreste-Suroeste, coincidiendo directamente con el gradiente altitudinal. Griffiths *et al* (2009), reporta una relación positiva entre la humedad del suelo y la altitud debido a un régimen mayor de lluvias en la parte alta en comparación con la baja.

Respecto al tipo de vegetación, los promedios mostraron diferencias significativas entre las clases ($p= 0.033$), específicamente existe una clara diferencia entre la clase de *A. religiosa* (45.1%) y la de *P. hartwegii* (62.3%), separando así las condiciones de humedad para cada tipo de vegetación. Las diferencias entre tipos de vegetación pueden atribuirse a la correlación existente con la altitud; el bosque de *P. hartwegii* se encuentra en las mayores altitudes de la CRM donde en promedio se presenta una mayor precipitación y, por lo tanto, una mayor cantidad de humedad que se aporta al suelo. El hecho de que las texturas más arenosas y menos

arcillosas se encuentren en la parte baja favorece una menor retención de humedad del suelo, favoreciendo la transportación del agua a horizontes inferiores (Griffiths *et al*, 2009; Yimer *et al*, 2006; Zehetner y Miller, 2006).

Cuadro 15. Promedios del porcentaje de humedad con su error estándar para cada una de las variables ambientales.

Vegetación	N=	Humedad (%)
<i>Abies religiosa</i>	19	45.1 ± 3.6 a
<i>Abies religiosa-Pinus hartwegii</i>	8	54.9 ± 6.1 b
<i>Pinus hartwegii</i>	16	62.3 ± 4.0 b
<i>Pinus hartwegii-Abies religiosa</i>	8	54.6 ± 7.0 b
Altitud (msnm)		
2500 - 3000	12	45.0 ± 5.7 a
3000 - 3400	11	45.0 ± 4.6 a
3400 - 3800	28	58.9 ± 3.2 b
Orientación		
Norte	9	57.6 ± 6.1
Noreste	6	48.6 ± 7.1
Este	9	58.8 ± 5.5
Sureste	8	58.2 ± 7.1
Sur	5	39.1 ± 6.8
Oeste	6	50.4 ± 6.3
Noroeste	8	46.7 ± 6.1
Suma		52.8 ± 2.5

*Letras diferentes entre las filas denotan diferencias significativas al $P < 0.05$, Fisher's LSD.

Los promedios en las diferentes clases de orientación de la pendiente presentan variaciones importantes en el porcentaje de humedad; los mayores promedios se observan en las orientaciones Este (58.8%) y Sureste (58.2%), y los menores en las orientaciones Sur (39.1%) y Noroeste (46.7%); sin embargo, a pesar de la heterogeneidad apreciable entre los promedios, no existen diferencias significativas entre las diferentes clases; en cambio la orientación Sur ($p = 0.051$) muestra una tendencia a ser diferente de la clase Este. Se esperaban diferencias mayores entre las distintas orientaciones, a causa de las supuestas diferencias en radiación solar en las orientaciones; no obstante, el hecho de que la orientación Sur tenga el porcentaje más bajo se puede explicar por el hecho de que en el hemisferio Norte los rayos solares tienen una mayor incidencia sobre las laderas Sur y una menor en las laderas Norte, provocando una diferencia en la temperatura del suelo (Griffiths *et al*, 2009); no obstante son necesarios estudios con un mayor detalle para poder confirmarlo.

5.2.4 Mapa de Distribución

El mapa del porcentaje de humedad (Fig. 21) muestra en general un gradiente Noreste-Suroeste de humedad, oscilando en un intervalo de 30 a 75%, observándose en la parte Sur de la cuenca una zona angosta de menor humedad; dicha zona no parece obedecer a las relaciones altitudinales y de precipitación anteriormente descritas. No obstante, si se observa el mapa de errores de la predicción (Anexo III. B) se advierte que esa zona es la de mayor incertidumbre, la cual obedece al hecho de que la parte Sur de la CRM fue la que menor intensidad de muestreo presentó. A pesar de esto, la interpolación del mapa fue muy buena y los errores (Anexo II.A) se encontraron dentro de las tolerancias aceptables (Giraldo, 2002).

Porcentaje de humedad del horizonte superficial en la cuenca del río Magdalena

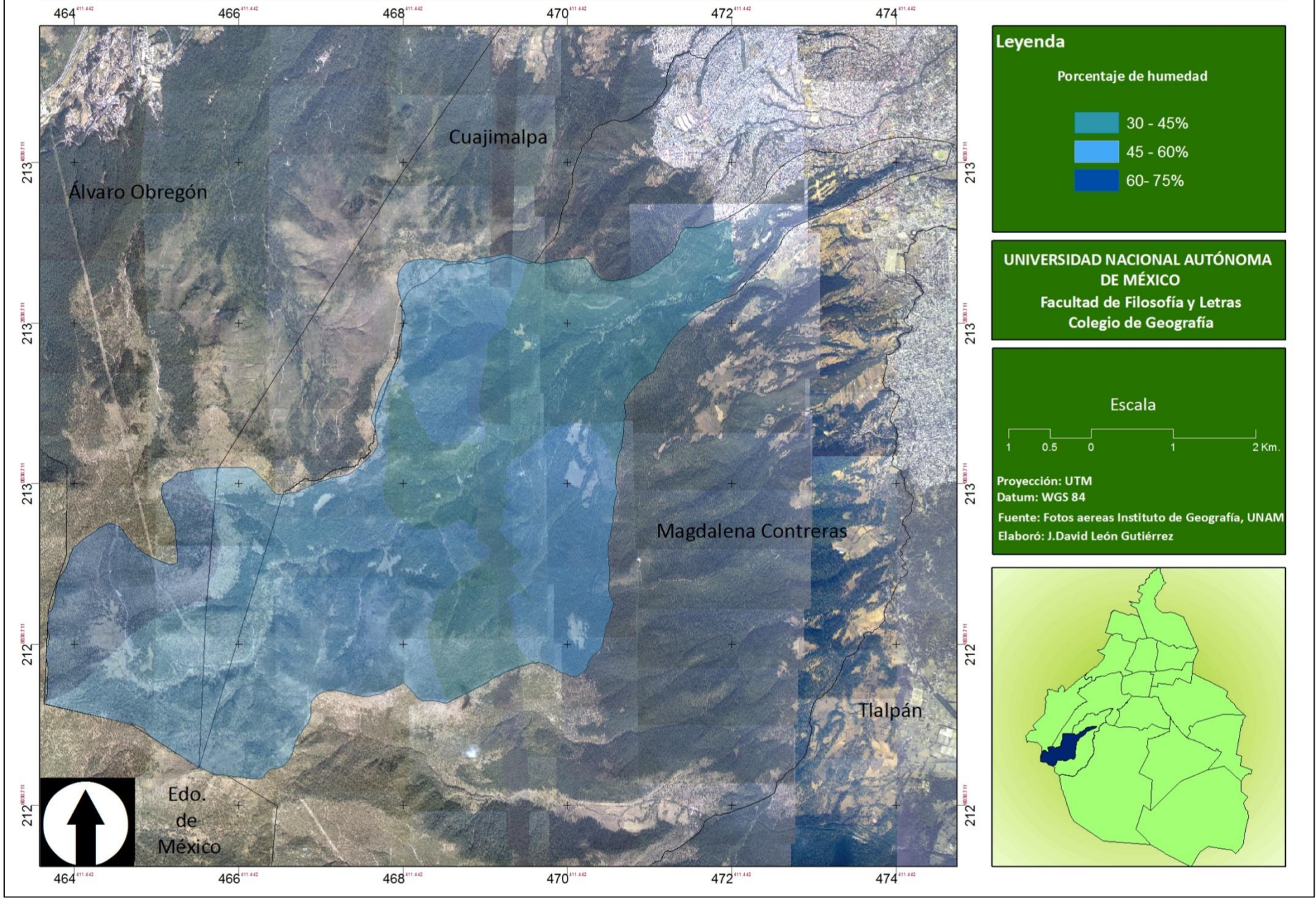


Fig. 21 Mapa de porcentaje de humedad del horizonte superficial en la cuenca del río Magdalena.

5.2.5 Color

De acuerdo con los datos obtenidos se puede observar que, en general, los colores observados según la clasificación de Munsell se distribuyen en seis clases (Fig. 16), abarcando colores predominantemente oscuros, principalmente negros (10YR 2/1, 7.5/YR 2/2) y pardos (10YR 2/2, 7.5YR 2.5/3), observándose en menor medida los colores grises (10YR 3/1). Shoji *et al* (1993), mencionan que los valores de matiz para andosoles ricos en MOS oscilan entre el 7YR y el 10YR, así como el brillo y el croma se ubican por debajo de 3. Algunos otros autores (Prado *et al*, 2007; Yimer *et al*, 2006) reportan colores similares en andosoles, atribuyendo los colores más oscuros al alto contenido de MOS y el tipo de ácidos húmicos presentes en el suelo.

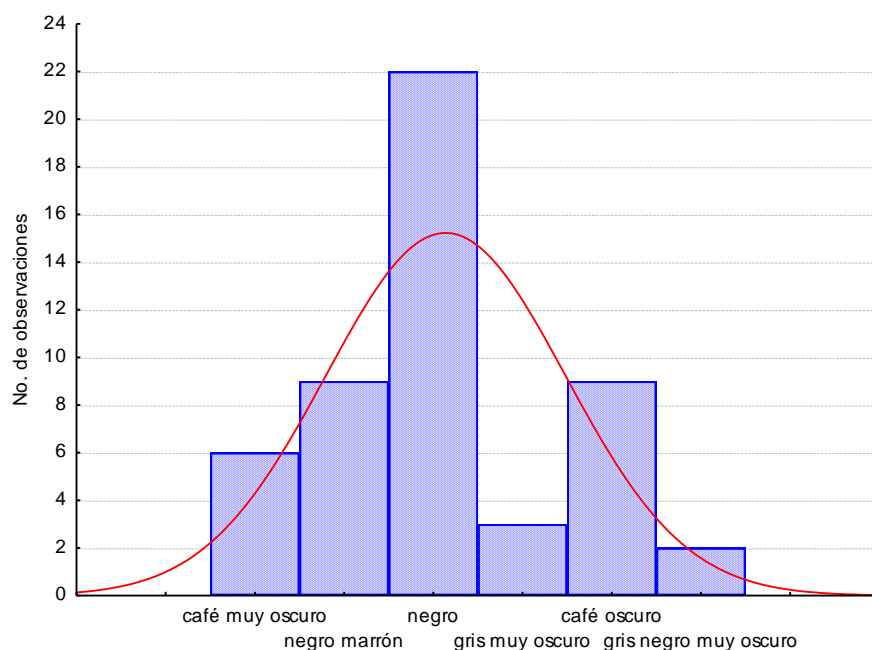


Fig. 22 Histograma de frecuencias de los colores observados en el área de estudio.

Los colores del horizonte superficial en la clase baja de altitud son predominantemente negros y pardos en tonalidades oscuras; para la parte media los colores negros predominan sobre los pardos y en la parte alta la tendencia se repite, aunque mostrando una dominancia de los colores negros mucho más marcada, lo cual indica un mayor contenido de MOS en la parte alta de la cuenca, lo cual se relaciona directamente con los datos obtenidos en este estudio. Respecto al tipo de vegetación la clase representada por *A. religiosa* presenta colores negros y pardos, mostrando una ligera mayoría de los segundos; en cuanto la clase de *P. hartwegii*, predominan los colores negros y pardos con tonalidades oscuras. Se sabe que colores más oscuros indican un mayor contenido de MOS (Fisher, 2000) así que, de manera cualitativa, se infiere que las áreas con bosque de *A. religiosa* en la CRM tienen menos MOS que las de *P. hartwegii*. En cuanto a la orientación de la pendiente no se encontró variación para todas las clases; hubo predominancia de los colores negros sobre los pardos, no observándose ninguna tendencia entre los datos.

5.3 Propiedades Químicas

5.3.1 Reacción del suelo o pH

Los promedios del pH en H₂O y KCl presentan diferencias evidentes entre dos de los tres grupos de las variables ambientales (Cuadro 16). El valor promedio de pH (6.0) en agua es considerado como medianamente ácido (USDA, 1999), y el hecho de que este sea mayor al promedio de pH (5.0) en cloruro de potasio refleja un dominio de cargas negativas con una alta acidez de intercambio; valores cercanos a 5 de pH (KCl) indican un dominio del Al activo en la solución el suelo, provocando una disminución en las bases intercambiables y, por lo tanto, un incremento en la acidez del suelo; valores de pH ácidos mayores a 4.9 son característicos de andosoles con alta presencia de alófanos (Broquen *et al*, 2002). En el caso de la altitud se observan diferencias significativas en el pH en H₂O ($p= 0.0003$) y en el pH en KCl ($p= 0.0003$), concretamente entre las clases correspondientes a la altitud baja (6.3, H₂O y 5.4, KCl) y alta (5.8, H₂O y 4.9 KCl), advirtiendo un cambio dependiente de la altitud en el pH. Una relación negativa entre la altitud y pH en andosoles ha sido reportada por diversos autores (Fenn *et al*, 2006; Griffiths *et al*, 2009; Rahman *et al*, 2008, Rasmussen *et al*; 2006 Yimer *et al*, 2006; Zehetner y Miller, 2006), la cual puede explicarse por el hecho de que al incrementar la altitud también se incrementa la precipitación, lo que causa un incremento en la lixiviación, la reducción de los cationes solubles y una mayor actividad de ácidos húmicos, ocasionando una mayor actividad del H⁺ y provocando niveles bajos de pH.

Cuadro 16. Promedios del pH en H₂O y KCl con su error estándar para cada una de las variables ambientales.

Vegetación	N=	pH (H2O)	pH (KCl)
<i>Abies religiosa</i>	19	6.1 ± 0.06 a	5.2 ± 0.07 a
<i>Abies religiosa-Pinus hartwegii</i>	8	5.9 ± 0.06 a	5.0 ± 0.11 b
<i>Pinus hartwegii</i>	16	5.8 ± 0.05 b	4.9 ± 0.06 b
<i>Pinus hartwegii-Abies religiosa</i>	8	6.0 ± 0.14 a	5.0 ± 0.12 b
Altitud (msnm)			
2500 – 3000	12	6.3 ± 0.05 a	5.4 ± 0.09 a
3000 – 3400	11	6.0 ± 0.11 b	5.1 ± 0.09 b
3400 – 3800	28	5.8 ± 0.03 b	4.9 ± 0.04 b
Orientación			
Norte	9	6.0 ± 0.11	5.1 ± 0.09
Noreste	6	6.0 ± 0.11	5.0 ± 0.11
Este	9	6.1 ± 0.08	5.2 ± 0.12
Sureste	8	5.8 ± 0.09	5.0 ± 0.12
Sur	5	5.9 ± 0.13	4.9 ± 0.11
Oeste	6	5.8 ± 0.14	5.0 ± 0.19
Noroeste	8	6.0 ± 0.04	5.2 ± 0.13
Suma		6.0 ± 0.04	5.0 ± 0.04

*Letras diferentes entre las filas denotan diferencias significativas al $P < 0.05$, Fisher's LSD.

En cuanto a la vegetación las diferencias significativas encontradas en los promedios del pH en agua ($p=0.02$) y en el pH en KCl ($p=0.01$) se presentan entre las clases de *P. hartwegii* (5.8, H₂O y 4.9, KCl) y *A. religiosa* (6.1, H₂O y 5.2, KCl), lo cual muestra un cambio en el pH de acuerdo con la presencia o ausencia de una de las especies arbóreas del sitio de estudio (Cuadro 16). Los intervalos de pH para los dos tipos de vegetación, en general concuerdan con los valores óptimos de pH establecidos por Conafor (2006), 6.1-6.9 para *P. hartwegii* y 5.0-7.0 para *A. religiosa*.

Los resultados se asemejan en cierta medida a los anteriormente reportados para la CRM. Jujnovsky (2006), menciona valores de pH (H₂O) en nueve perfiles de suelo que oscilan para el bosque de *P. hartwegii* entre 4.1 y 4.5, y para el bosque de *A. religiosa* entre 4.6 y 5.1, siendo éstos más ácidos a los encontrados en este estudio, lo cual podría ser atribuible a la diferencia en el número de sitios de muestreo así como a la profundidad de las muestras, sin embargo a pesar de que no se mencionan diferencias estadísticas entre el pH en los diferentes tipos de vegetación sí se observa una tendencia a ser más ácido en el bosque de *P. hartwegii*. Moreno (2008), reporta pH's (H₂O) en dos parcelas de estudio en suelos superficiales, de 4.9 para *P. hartwegii* y 5.10 para *A. religiosa* encontrando diferencias significativas entre el tipo de vegetación; una vez más, los promedios son más ácidos con respecto al presente trabajo, esto probablemente se explique por la dilución a la que se realizaron las mediciones. Por último, Santibáñez (2009), reporta en 35 sitios para el bosque de *A. religiosa* un pH (H₂O) de 5.30 ± 0.38 a una profundidad de 20 cm, mismo que se asemeja al reportado en este trabajo, las diferencias nuevamente pueden ser atribuidas a la densidad de muestreo. Con base en las comparaciones entre los trabajos previos y el presente, las diferencias de acidez del suelo seguramente están relacionadas principalmente a la escala de los mismos; los estudios previos han sido realizados a una escala pequeña en comparación con la actual, además la muy variable cantidad de sitios de muestro en cada uno de los trabajos complica el cotejo de los datos.

Los promedios en las diferentes clases de orientación manifiestan una mínima variación, mostrando un grupo de datos muy homogéneos. Prueba de ello es el pequeño intervalo de variación (0.3 H₂O y KCl) de los promedios, las orientaciones con el promedio mayor son Este (6.1, H₂O y 5.2, KCl) y Noreste (5.2, KCl) y las orientaciones con el promedio menor Sureste y Oeste (5.8, H₂O), así como Sur (4.9, KCl). No se encontraron diferencias significativas entre las diferentes clases, algunos estudios reportan relaciones significativas entre los valores pH y diferentes orientaciones (Griffiths *et al* 2009; Seibert *et al*, 2007), comúnmente atribuyendo dichas diferencias al hecho de que en las orientaciones más expuestas, una mayor exposición solar puede elevar la tasa de mineralización y por lo tanto aumentar la concentración de los cationes básicos; así como a la diferencia en humedad la cual influye en la velocidad y cantidad de cationes lixiviados (Broquen *et al*, 2002). El hecho de que no se hayan encontrado relaciones entre la orientación y el pH no quiere decir que estas no existan.

5.3.1 Mapa de distribución

Los valores de pH en el mapa (Fig. 22) oscilan entre 5.3 a 6.8; es evidente la relación negativa existente entre la altitud y el pH, observándose los valores más ácidos en la parte alta de la cuenca y los más neutros en la parte baja. El semivariograma de la interpolación (Anexo I.B) muestra una fuerte correlación espacial, la cual es bien representada en el mapa de distribución; algunos autores describen al Kriging como un buen método de

pH del horizonte superficial en la cuenca del río Magdalena

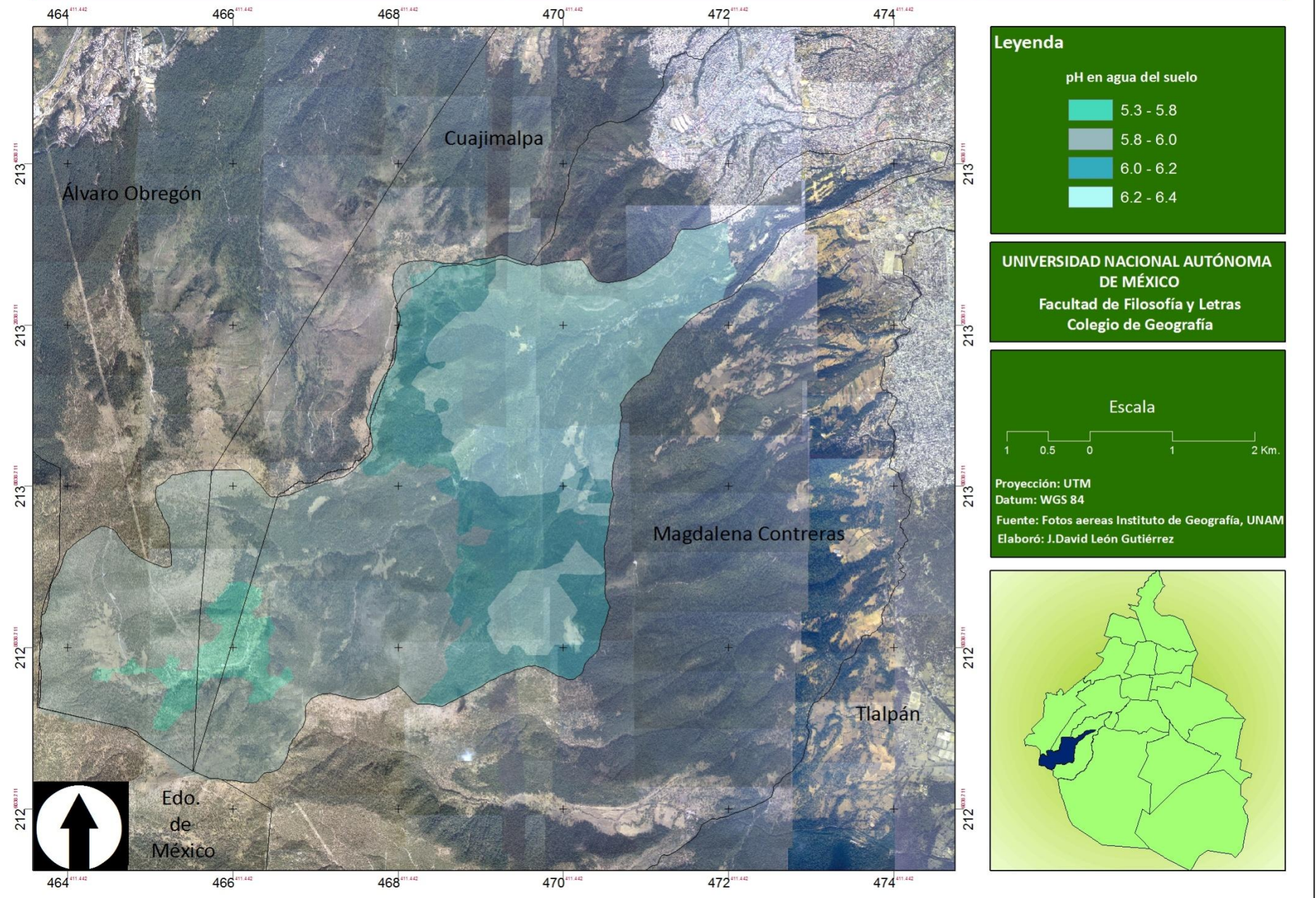


Fig. 23 Mapa de pH del horizonte superficial en la cuenca del río Magdalena.

interpolación para el pH en los suelos en áreas grandes con una adecuada cantidad de sitios de muestreo (Henríquez *et al*, 2005; Villatoro *et al*, 2008; Yimer *et al*, 2006; Wenjiao *et al*, 2009). En el mapa de errores de la predicción se observa un área muy pequeña de incertidumbre, principalmente en las zonas Sureste y Noreste de la cuenca, las cuales coinciden con las áreas con menor cantidad de sitios de muestreo. En general, la distancia y el número de sitios de muestreo resultaron óptimos para la elaboración del semivariograma; por consiguiente, el Kriging ordinario mostró ser un buen método de estimación para la variable de pH en la CRM.

5.3.2 Conductividad Eléctrica

Los promedios de la conductividad eléctrica muestran algunas diferencias en las clases de las variables ambientales. En general los valores de la CE en la CRM son bajos (Núñez, 2000), promediando 2.5 dS/m, que indica la poca salinidad de los suelos en la zona, lo cual era de esperarse ya que la CE está estrechamente relacionada con la humedad, tasa de evapotranspiración, textura, porosidad, pH y la cantidad de cationes del suelo (Corwin y Lesch, 2005; Friedman, 2005).

Cuadro 17. Promedios de la conductividad eléctrica con su error estándar para cada una de las variables ambientales.

Vegetación	N=	Conductividad (dS/m)
<i>Abies religiosa</i>	19	2.7 ± 0.2
<i>Abies religiosa-Pinus hartwegii</i>	8	3.1 ± 0.4
<i>Pinus hartwegii</i>	16	1.9 ± 0.1
<i>Pinus hartwegii-Abies religiosa</i>	8	2.3 ± 0.3
Altitud (msnm)		
2500 - 3000	12	2.9 ± 0.3
3000 - 3400	11	2.7 ± 0.4
3400 - 3800	28	2.2 ± 0.1
Orientación		
Norte	9	2.6 ± 0.4
Noreste	6	2.3 ± 0.8
Este	9	2.2 ± 0.4
Sureste	8	3.0 ± 0.4
Sur	5	2.5 ± 0.3
Oeste	6	2.2 ± 0.3
Noroeste	8	2.7 ± 0.3
Suma		2.5 ± 0.1

En el caso de la altitud, el promedio mayor se observa en la clase baja (2.9 dS/m) y el más bajo en la clase alta (2.2 dS/m); no se observaron diferencias significativas entre las clases; sin embargo, se observa una clara tendencia de la CE a disminuir conforme aumenta la altitud (Cuadro 17), lo cual puede explicarse por el hecho de que a diferencia de los suelos de las partes bajas, en partes altas de la cuenca se presenta una mayor pérdida de iones por la humedad del suelo, y una mayor lixiviación de cationes por el pH ácido (Brady y Weil, 1996; Friedman, 2005).

Respecto al tipo de vegetación, la CE revela diferencias significativas entre sus clases ($p= 0.040$), específicamente entre la clase de *A. religiosa* (3.1dS/m) y *P. hartwegii* (1.9dS/m), observando una clara disminución de la CE en los sitios en donde está presente el *P. Hartwegii* (Cuadro 17), lo cual confirma la estrecha relación de la altitud con la vegetación. Santibáñez (2009), reporta un valor promedio de CE para el bosque de *A. religiosa* de la CRM de 3.5dS/m, el cual es muy parecido al promedio encontrado en el presente estudio (2.7dS/m), donde el bajo valor de CE se le atribuyó principalmente a una combinación de los factores de: la humedad, la temperatura, la altitud, la pendiente y la radiación solar.

La orientación de la pendiente, no muestra diferencias significativas entre las clases, sólo se observa una ligera variación en los promedios de las diferentes orientaciones, el mayor promedio se presentó en las orientaciones Sureste (3.0dS/m) y Noroeste (2.7dS/m), mientras que el más bajo lo comparten las orientaciones Oeste y Este (2.2dS/m). La homogeneidad de los datos de CE no era esperada, debido principalmente al hecho de que como se ha mencionado anteriormente la CE depende de diversos factores de los cuales destacan la humedad, textura y la tasa de evapotranspiración del suelo, de los cuales se ha reportado en algunos trabajos su estrecha relación con la orientación de la pendiente (Yimer *et al*, 2006), Corwin y Lesch (2005) destacan a la orientación como un factor topográfico determinante en la variabilidad espacial de la CE.

5.3.2 Mapa de distribución

Los intervalos de la CE en el mapa de predicción (Fig. 23) oscilan entre 2.0 y 4.0dS/m, mostrando muy poca variación; claramente se observa un gradiente ascendente en sentido Noreste-Suroeste, el cual corresponde con el gradiente altitudinal. El semivariograma (Anexo I.B.) muestra una dependencia espacial de los datos con un elevado efecto nugget lo cual indica que hay una amplia varianza aleatoria, misma que puede deberse a un error en la distancia entre puntos de muestreo (Sommer *et al*, 2000; Villatoro *et al*, 2008). Sin embargo, el mapa de errores de la predicción (Anexo III.B) muestra poca incertidumbre, observándose un gradiente que coincide con la altitud, con mejores predicciones en las partes altas en comparación con las bajas.

5.3.3 Fósforo

Los promedios del fósforo disponible muestran variaciones en las diferentes variables ambientales; sin embargo, no se encontraron diferencias significativas entre los grupos. Cabe señalar que existió una alta variabilidad en los datos de los sitios de muestreo, lo que podría indicar una fuerte dependencia espacial en los datos (Giraldo, 2002), así como una baja densidad de muestreo. El promedio de P disponible en este estudio (10.4 mg/Kg) para la CRM, es considerado como un contenido típico para suelos ácidos (CSTPA, 1980).

Valores bajos o medios eran de esperarse ya que está bien documentado que la cantidad de P disponible en suelos de origen volcánico es baja debido a que el P es fuertemente adsorbido por el aluminio y el hierro, dejándolo en formas no disponibles para las plantas y evidenciando la presencia de alófanos los cuales se caracterizan por fijar P y grandes cantidades de Al y Fe activos (Shoji *et al*, 1993; Van Ranst *et al*, 2004).

Conductividad eléctrica del horizonte superficial en la cuenca del río Magdalena

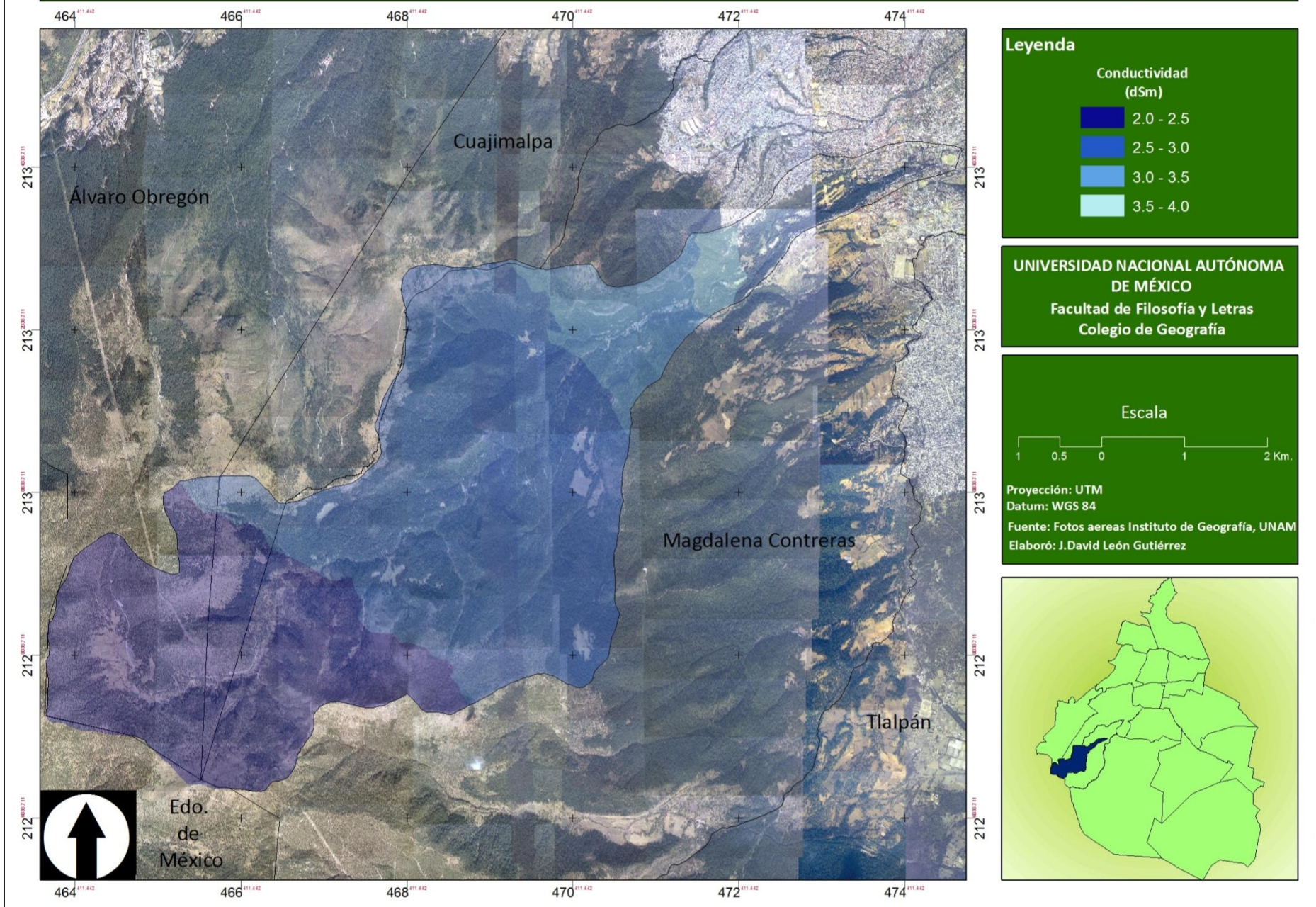


Fig. 24 Mapa de conductividad eléctrica del horizonte superficial en la cuenca del río Magdalena.

En el caso de la altitud, se observa que el promedio mayor se presentó en la clase baja (13.6 mg/Kg) y el menor en la clase alta (6.5 mg/Kg), advirtiendo una tendencia altitudinal de los promedios en el contenido de fósforo (Cuadro 18). Se han reportado relaciones negativas entre la altitud y el P disponible en condiciones ambientales y de suelo similares (Fenn *et al*, 2006; Peña-Ramírez *et al*; 2009; Santibáñez; 2009), la cual puede explicarse por el hecho de que a mayor altitud disminuye el pH, lo que promueve un mayor contenido de alófanos y complejos formados por Al⁺ y Fe⁺ los cuales se encargan de retener e inmovilizar el P de la solución del suelo.

Cuadro 18. Promedios del fósforo disponible con su error estándar para cada una de las variables ambientales.

Vegetación	N=	Fósforo (mg/Kg)
<i>Abies religiosa</i>	19	11.4 ± 1.8
<i>Abies religiosa-Pinus hartwegii</i>	8	10.2 ± 4.1
<i>Pinus hartwegii</i>	16	6.5 ± 2.8
<i>Pinus hartwegii-Abies religiosa</i>	8	10.1 ± 2.8
Altitud (msnm)		
2500 - 3000	12	13.6 ± 2.8
3000 - 3400	11	13.2 ± 3.5
3400 - 3800	28	7.9 ± 1.6
Orientación		
Norte	9	11.6 ± 3.3
Noreste	6	14.2 ± 3.6
Este	9	4.8 ± 1.7
Sureste	8	16.2 ± 3.5
Sur	5	11.6 ± 8.1
Oeste	6	8.3 ± 4.0
Noroeste	8	7.7 ± 1.6
Suma		10.4 ± 1.3

*Letras diferentes entre las filas denotan diferencias significativas al P <0.05, Fisher's LSD.

Respecto a las clases de vegetación, el promedio mayor se presentó en la clase de *A. religiosa* (11.4 mg/Kg) y el menor en la clase de *P. Hartwegii* (6.5 mg/Kg), observándose una tendencia en el contenido de fósforo dependiente de la vegetación, estadísticamente no se presentan diferencias significativas entre las clases. Santibáñez (2009), reporta un promedio de 10.95±2.35 mg/Kg para el bosque de *A. religiosa*, bastante similar al observado en este trabajo. Diferencias en el P disponible en diferentes tipos de vegetación han sido observadas en otros estudios (Fenn *et al*, 2005; Peña-Ramírez *et al*, 2009; Yimer *et al*, 2006), atribuyéndolas a el tipo de MOS proveniente de las plantas, el grado de descomposición de ésta y su tasa de mineralización. En el caso de la CRM, Moreno (2008) reporta concentraciones de P (Olsen) en dos parcelas de estudio para *P. hartwegii* (14.33 mg/Kg) y *A. religiosa* (38.31mg/Kg), las cuales son mayores a las concentraciones encontradas en este estudio, dicha discrepancia puede atribuirse principalmente a la diferencia en el número de sitios de muestreo, así como en el método de extracción del P disponible (Vanegas *et al*, 1999).

Fósforo disponible en el horizonte superficial de la cuenca del río Magdalena

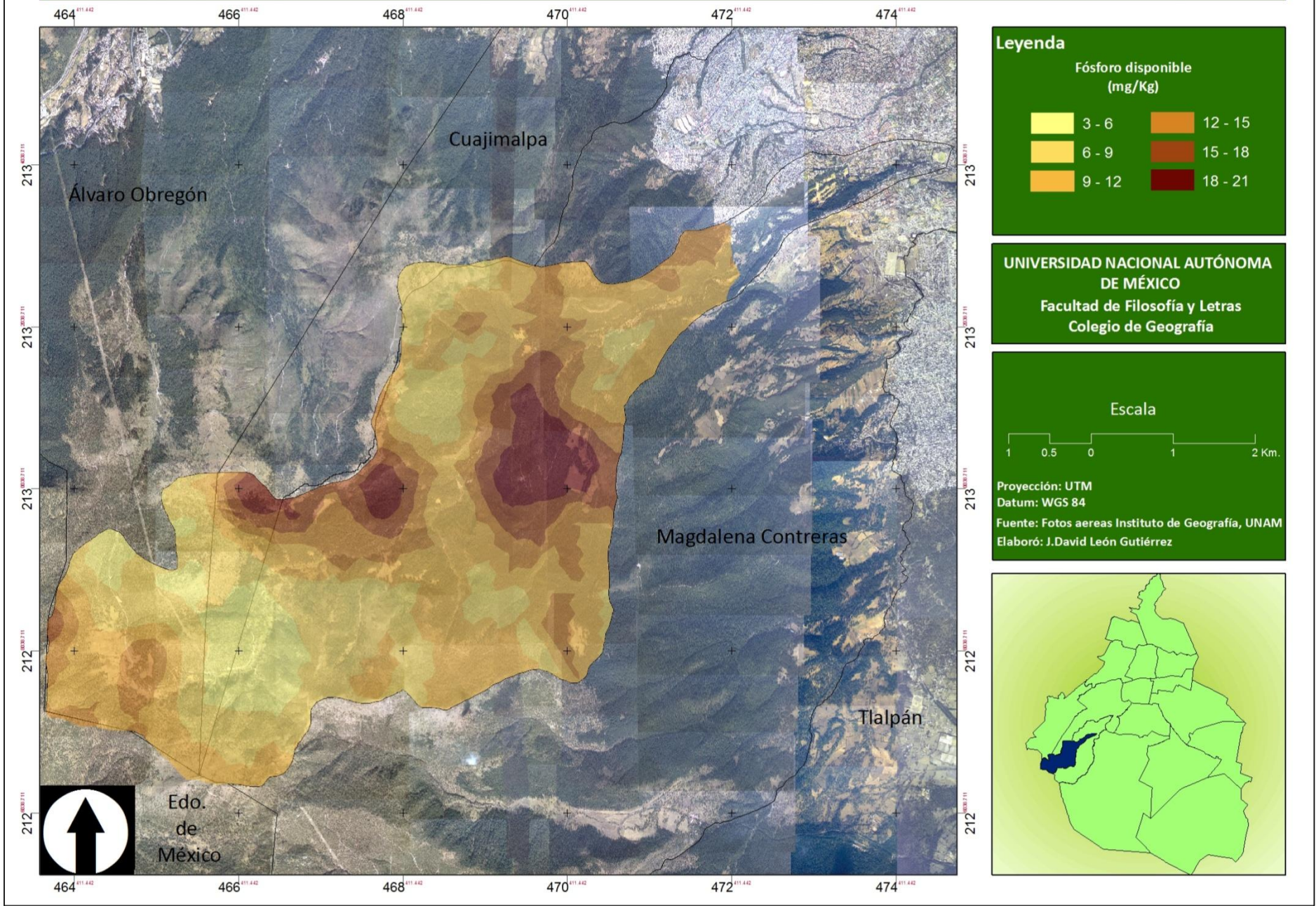


Fig. 25 Mapa de Fósforo disponible del horizonte superficial en la cuenca del río Magdalena.

En el caso de la orientación, el promedio mayor se presentó en las orientaciones Sureste (16.2 mg/Kg) y Noreste (14.2 mg/Kg), y el menor en las orientaciones Este (4.8 mg/Kg) y Noroeste (7.7 mg/Kg). Se observan contrastes entre los promedios mayores y menores; sin embargo, no se encuentran diferencias significativas en las clases, a pesar de ello existe una tendencia en los datos. Trabajos como el de Yimer *et al* (2006) describen la estrecha relación de la orientación de la pendiente con el P disponible, encontrando mayores concentraciones en el horizonte superficial en las orientaciones Sur y Este, atribuidas a un régimen de humedad alto, el cual favorece la mineralización de la MOS. Probablemente en la CRM no se encuentran diferencias significativas por el hecho de la variabilidad de los datos.

5.3.3 Mapa de Distribución

La predicción del P disponible (Fig. 24) mostró valores mínimos de 3-6 mg/Kg y máximos de 18-21 mg/Kg, mismos que indican una alta variabilidad. En general las concentraciones más bajas se ubicaron en las partes altas de la CRM, y las concentraciones más altas se presentaron en la parte media-baja. Como se mencionó anteriormente la interpolación del P disponible presentó los mayores errores; de acuerdo con el semivariograma (Anexo I.B) se aprecia que la distancia entre los sitios de muestreo no fue la óptima; la distancia entre los sitios debe ser menor para poder captar de mejor forma la variabilidad espacial y reducir valores extremos. A pesar de ello la interpolación se mantuvo dentro de los límites aceptables (Giraldo, *et al* 2000; Villatoro *et al*, 2008). De acuerdo con el mapa de errores de la predicción (Anexo III.C), las zonas con menor incertidumbre se encuentran en la parte alta (Suroeste) de la cuenca y las de mayor en la parte baja (Noreste-Sur); cabe destacar que las zonas con menor error coinciden con las áreas de menor concentración, lo cual podría explicarse por la presencia de valores extremos en los datos.

5.3.5 Materia Orgánica

Los promedios del contenido de MOS obtenidos en la CRM son considerados altos para suelos derivados de cenizas volcánicas (Fassbender *et al*, 1994). Se encontraron variaciones en las diferentes variables ambientales, observándose algunas diferencias entre algunas de las clases. Particularmente en los promedios de las clases de altitud se encontraron diferencias significativas ($p= 0.009$) entre las clases baja (9.2%) y alta (13.2%), observando una conexión entre la altitud y el contenido de materia orgánica (Cuadro 19), dicha conexión ha sido reportada en otros trabajos (Dai y Huang, 2006; Griffiths, 2009; Jenny, 1980), donde se encontró una correlación positiva entre la MOS la altitud, y la precipitación, así como una correlación negativa con la temperatura. Las temperaturas bajas y la humedad son probablemente los factores responsables de una baja tasa de mineralización de la materia orgánica y, por lo tanto, de su acumulación en las zonas más altas; Dicha acumulación también puede ser influenciada por la profundidad del suelo; suelos menos profundos contienen una mayor concentración de MOS, además se ha observado que la cantidad y calidad de MOS almacenada puede variar de acuerdo con el tipo de material parental (Dai y Huang, 2006; Fisher *et al*, 2000; Griffiths, 2009; Wagai *et al*, 2008).

En el caso de la vegetación se observan variaciones entre los promedios correspondientes a la clase de *A. Religiosa* (10.9%) y *P. Hartwegii* (13.6%), advirtiéndose una tendencia a ser mayor o menor dependiendo del tipo de vegetación; sin embargo, no se observan diferencias significativas entre las clases. En general los resultados obtenidos en éste contrastan con los obtenidos en dos trabajos previos en la CRM. Jujnovsky (2006) reporta valores de porcentaje de MOS (método de determinación no especificado) en un único intervalo de 15-

30% para el bosque de *Abies religiosa* y *Pinus hartwegii*; dichos valores difieren del promedio de 10.9 y 13.6 % encontrado para las mismas clases de vegetación en el presente trabajo. Es necesario mencionar que hubo diferencias en el muestreo y tipo de muestras analizadas ya que éstas fueron obtenidas de nueve perfiles distribuidos aleatoriamente en la CRM. Santibáñez (2009) reporta un promedio de la MOS (Walkley y Black) para el bosque de *Abies religiosa* de $20 \% \pm 5.06$, el cual es menos contrastante con el presente estudio; las diferencias que se presentan pueden deberse a al método de determinación empleado, ya que si se determina de manera indirecta el porcentaje de COT puede ser variable.

Cuadro 19. Promedios del porcentaje de materia orgánica con su error estándar para cada una de las variables ambientales.

Vegetación	N=	MOS (%)
<i>Abies religiosa</i>	19	10.9 ± 0.8
<i>Abies religiosa-Pinus hartwegii</i>	8	12.6 ± 1.3
<i>Pinus hartwegii</i>	16	13.6 ± 0.8
<i>Pinus hartwegii-Abies religiosa</i>	8	11.9 ± 0.6
Altitud (msnm)		
2500 - 3000	12	9.2 ± 0.8 a
3000 - 3400	11	11.9 ± 1.2 b
3400 - 3800	28	13.2 ± 0.6 b
Orientación		
Norte	9	12.9 ± 0.11
Noreste	6	12.8 ± 0.11
Este	9	13.1 ± 0.08
Sureste	8	10.8 ± 0.09
Sur	5	10.5 ± 0.13
Oeste	6	10.8 ± 0.14
Noroeste	8	11.0 ± 0.04
Suma		12.1 ± 0.5

**Letras diferentes entre las filas denotan diferencias significativas al $P < 0.05$, Fisher's LSD.*

Los promedios de la orientación de la pendiente presentan una mínima variación entre las distintas clases, observándose el mayor en la orientación Este (13.1%) y el menor en la orientación Sur (10.5%). Los promedios no muestran diferencias significativas; sin embargo, se puede observar una tendencia positiva en los valores de la MOS en las orientaciones Norte y, por el contrario, se observan valores menores en las orientaciones Sur. Estas tendencias coinciden con las correlaciones encontradas por Tatsuhara y Kurashige (2001), y Griffiths *et al* (2009) para el mismo tipo de suelo (andosol), atribuyendo dichas correlaciones a una reducción en la tasa de descomposición y un incremento en la producción primaria ocasionadas por el efecto sombra en las laderas Norte. Sin embargo asumir que en la CRM sucede el mismo caso es muy aventurado, ya que el muestreo no estuvo únicamente enfocado al tipo de orientación.

Porcentaje de materia orgánica en el horizonte superficial de la cuenca del río Magdalena

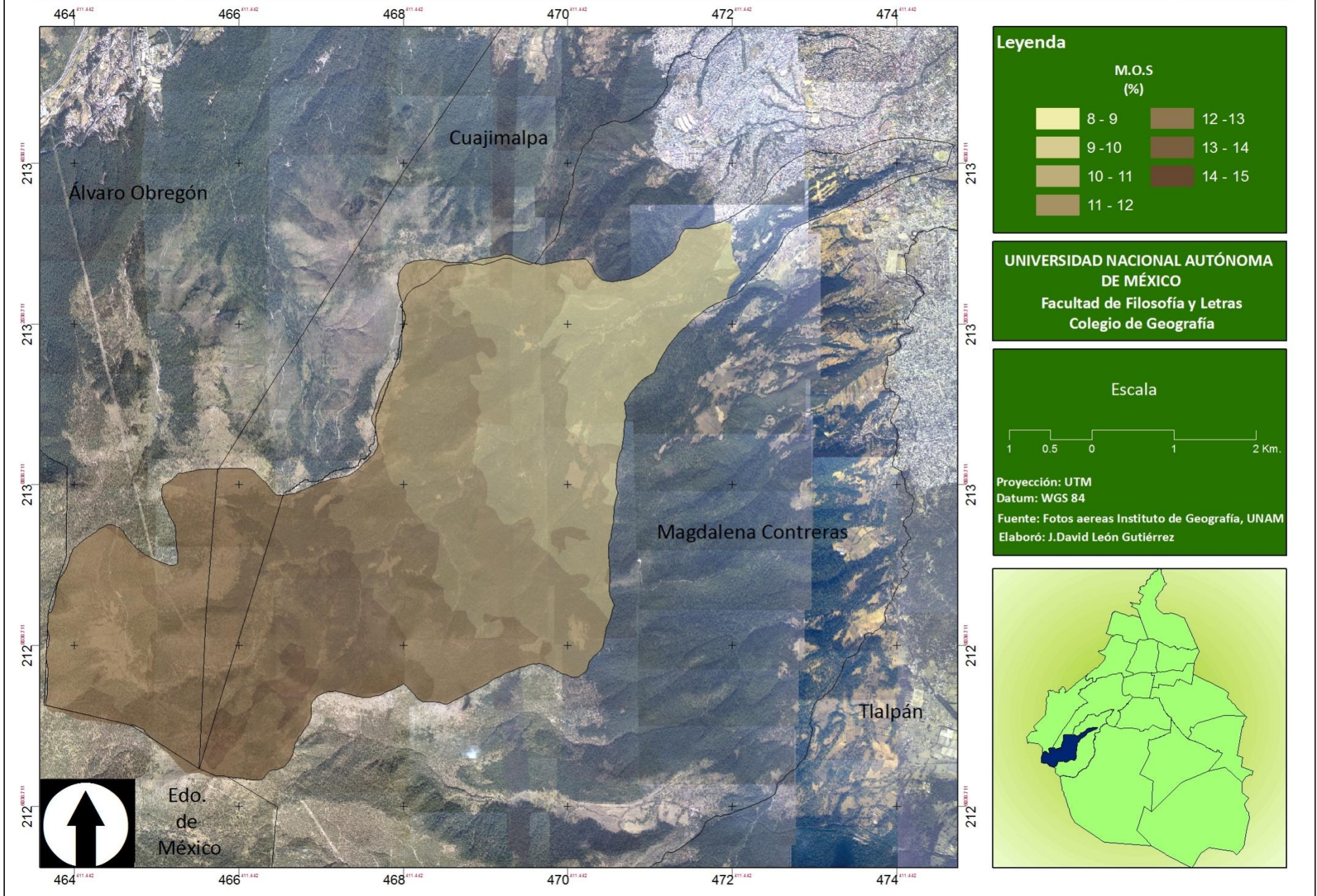


Fig. 26 Mapa del porcentaje de materia orgánica del horizonte superficial en la cuenca del río Magdalena.

5.3.5 Mapa de Distribución

Se observa un claro gradiente en el porcentaje de la MOS en dirección Noreste – Suroeste (Fig.25), el cual concuerda en cierta medida con el gradiente altitudinal y de vegetación de la CRM, con valores menores en las zonas más bajas y mayores en las zonas altas, mostrando una correlación positiva con la altitud, lo que concuerda con los resultados obtenidos mediante estadística descriptiva. Si se observa el mapa de errores de la predicción (Anexo III.C), los errores son mayores en las zonas límites, especialmente en la parte Sureste de la CRM. Los valores mínimos de la MOS oscilan entre 8 y 9 % y los máximos entre 11 y 12 %, lo cual indica que la variación en el porcentaje no es mayor a 4. Respecto a la orientación de la pendiente, el mapa generado en la interpolación no muestra diferencias en las concentraciones atribuibles a la orientación.

5.3.6 Carbono Orgánico Total

Los promedios del contenido del COT en las variables ambientales muestran variaciones y diferencias entre las diferentes clases (Cuadro 20). El promedio para el área de estudio es de 7.0 %, lo cual es considerado como alto para este tipo de suelos (Fassbender *et al*, 1994). En el caso específico de la altitud se observan diferencias significativas ($p= 0.009$) entre la clase baja (5.4%) y la clase alta (7.6%), mostrando un gradiente altitudinal en los promedios del COT. El hecho de que observar una relación entre la altitud y el contenido de carbono era de esperarse ya que se ha observado en numerosos trabajos (Aviña, 2007; Campos *et al*, 2007; Dai y Huang, 2006; Griffiths, 2009; Ordoñez, 2002; Rasmussen *et al*, 2006; Zornoza *et al*, 2007); en el presente estudio dichas relaciones también están presentes aunque de manera débil, observándose una relación positiva entre la altitud y el COT, dicha relación ha sido observada en otros trabajos para el mismo tipo de suelos y altitudes similares (Campos *et al*, 2007; Peña-Ramírez *et al*, 2009), lo que se debe al hecho de que el clima es uno de los factores que determinan la acumulación de carbono en el suelo, lo que aunado a condiciones de baja temperatura, acidez y humedad a lo largo del año favorecen la formación y preservación de complejos Aluminio(Al)-humus y minerales de rango corto, los cuales, particularmente en andosoles, favorecen la acumulación del COT, de manera que el Al^+ juega un papel muy importante en la dinámica del carbono a bajas temperaturas (Campos *et al*, 2007; Lal, 2005; Peña-Ramírez *et al*, 2009; Rasmussen, 2006; Shoji *et al*, 1993).

En el caso de la vegetación, los promedios no muestran diferencias significativas entre las diferentes clases; sin embargo, se observa una tendencia en los promedios del COT a ser diferentes entre las clases de *A. religiosa* (6.2%) y *P. Hartwegii* (7.8%), lo cual puede indicar una relación entre el COT y la vegetación, misma que ha sido reportada en distintos trabajos (Aviña, 2007; Campos *et al*, 2007; Lal, Li *et al*, 2010 2005; Zornoza *et al*, 2007); es evidente que dependiendo del tipo de vegetación es el tipo y cantidad de aporte de hojarasca y mantillo que se añade al suelo (Li *et al*, 2010). Sin embargo, también es sabido que la vegetación en la CRM obedece a un gradiente altitudinal (Galeana, 2008); por lo tanto, es posible que las tendencias en la relación del COT y la vegetación observadas en este estudio sean atribuibles en mayor medida a la relación del COT con la altitud. Aviña (2007) reporta contenidos del % de COT para el mismo tipo de suelo, profundidad y vegetación; 11.1 % para pino y 8.1 % para *Abies religiosa*, los cuales siguen la misma tendencia a ser diferentes según el tipo de vegetación.

La orientación de la pendiente muestra algunas variaciones en los promedios de COT en las distintas clases, encontrándose los mayores promedios en las orientaciones Norte (7.8%) y Noroeste (7.6%) y los menores en las orientaciones Sur (5.3%), Oeste y Sureste (6.7%). A pesar de observar una diferencia (2.5%) entre el menor y mayor promedio no se presentan diferencias significativas entre las distintas clases. A pesar de ello se nota una ligera tendencia en el contenido de COT a ser mayor en las orientaciones Norte que en las Sur; algunos autores

han reportado un comportamiento similar (Lal, 2005; Griffiths *et al*, 2009; Seibert *et al*, 2007), atribuyendo dicho comportamiento a la diferencia de humedad y cantidad de radiación solar entre las orientaciones, mismas que contribuyen de manera importante en la descomposición de la MOS la cual es la principal fuente de carbono del suelo.

Cuadro 20. Promedios del porcentaje de carbono orgánico total con su error estándar para cada una de las variables ambientales.

Vegetación	N=	C.O.T (%)
<i>Abies religiosa</i>	19	6.2 ± 0.4
<i>Abies religiosa-Pinus hartwegii</i>	8	7.3 ± 0.8
<i>Pinus hartwegii</i>	16	7.8 ± 0.5
<i>Pinus hartwegii-Abies religiosa</i>	8	6.9 ± 0.3
Altitud (msnm)		
2500 – 3000	12	5.4 ± 0.4 a
3000 – 3400	11	6.9 ± 0.7 b
3400 – 3800	28	7.6 ± 0.3 b
Orientación		
Norte	9	7.8 ± 0.5
Noreste	6	7.6 ± 1.0
Este	9	7.1 ± 0.6
Sureste	8	6.7 ± 0.8
Sur	5	5.3 ± 1.1
Oeste	6	6.7 ± 0.7
Noroeste	8	7.5 ± 0.9
Suma		7.0 ± 0.3

**Letras diferentes entre las filas denotan diferencias significativas al P <0.05, Fisher's LSD.*

5.3.6 Mapa de Distribución

En el mapa se observa un aumento en el porcentaje del COT en dirección, Noreste – Suroeste (Fig. 26), lo cual coincide con el gradiente altitudinal y por lo tanto de vegetación de la CRM, este comportamiento es muy similar al sucedido en el mapa de MOS, mismo que era de esperarse ya que la determinación de la MOS fue en relación al contenido de COT, de manera que los resultados de la MOS están altamente correlacionados con los del COT. Los porcentajes menores fueron de 5.5% ubicándose en la parte baja al Noreste de la CRM, los valores máximos excedieron el 8% y se ubicaron en la zona sur de la zona alta. Este comportamiento en las concentraciones del COT concuerdan parcialmente con lo observado en el análisis estadístico, observando una relación positiva entre el COT y la altitud, misma que no es muy clara en las zonas límite de la CRM, esto se puede explicar por la baja densidad del muestreo en los límites de la cuenca y respaldado por el mapa de errores de la predicción (Anexo III. C), donde se puede observar como las áreas más exactas se encuentran en el centro y la incertidumbre de los resultados crece conforme se acerca a las fronteras de la cuenca.

Porcentaje de carbono orgánico total en el horizonte superficial de la cuenca del río Magdalena

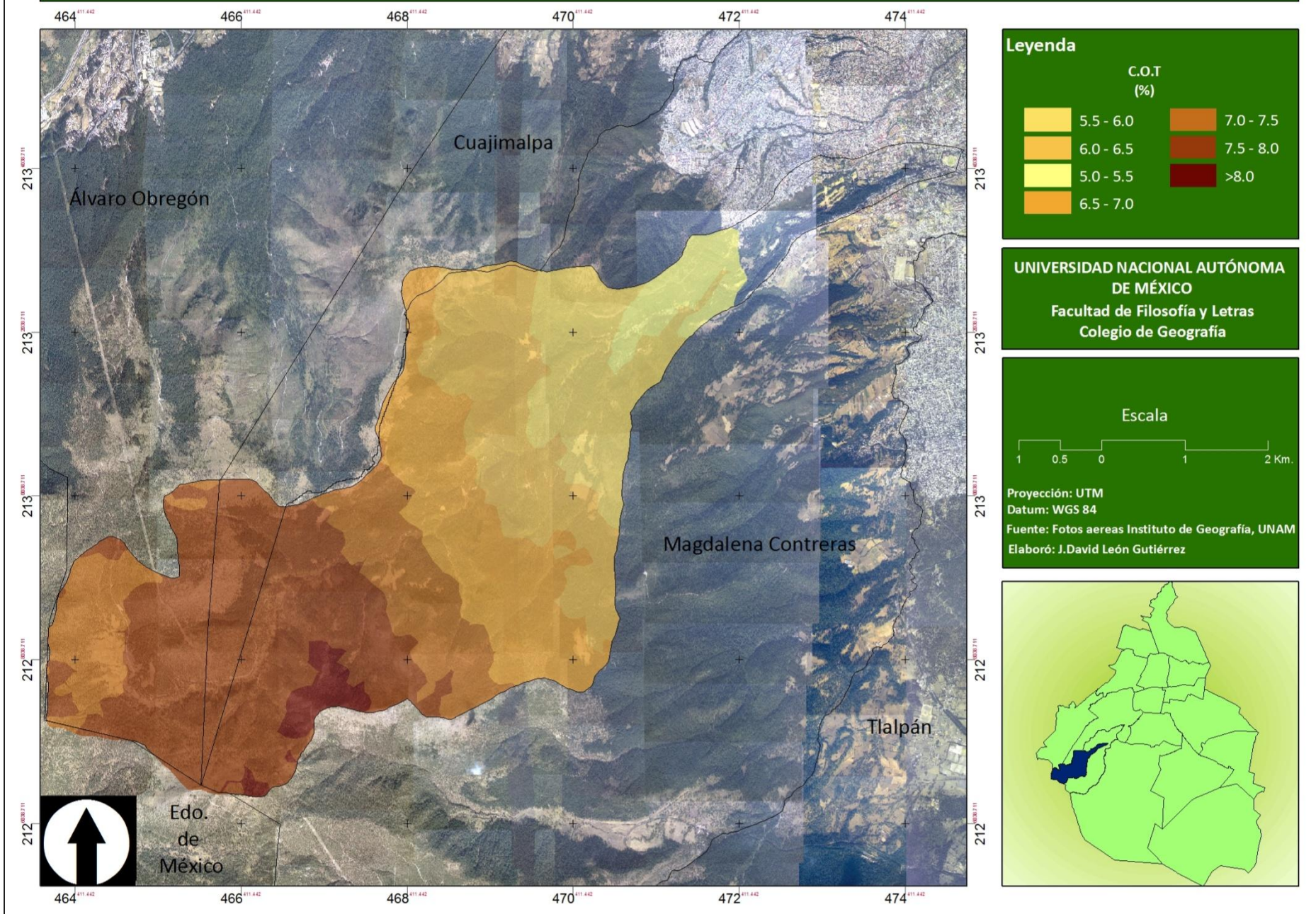


Fig. 27 Mapa del porcentaje de Carbono orgánico del horizonte superficial en la cuenca del río Magdalena.

5.3.7 Nitrógeno Total

Los promedios del nitrógeno total muestran variaciones en las tres variables ambientales (Cuadro 21). En general el promedio del porcentaje de N total (0.48) es considerado alto (Bruce *et al*, 1982), sin embargo altos contenidos de N tota son característicos de los andosoles (Shoji *et al*, 1993). Respecto a la altitud el promedio mayor se presenta en la clase alta (0.52%) y el menor en la clase baja (0.41%), sin embargo no se encuentran diferencias significativas entre estas dos clases, aunque se advierte una ligera tendencia del N total a ser dependiente de la altitud. Griffiths *et al* (2009), reporta relaciones positivas entre la altitud y el contenido de N total, atribuyéndolo a una mayor relación C/N, una reducida demanda de N mineralizado de las plantas y un enriquecimiento de N mineralizable en la MOS debido a la temperatura y la humedad. Fenn *et al* (2006), menciona que los vientos dominantes provenientes de la ciudad de México favorecen una alta depositación de N proveniente de la lluvia para la zona que comprende la CRM.

Cuadro 21. Promedios del contenido de Nitrógeno total con su error estándar para cada una de las variables ambientales.

Vegetación	N=	N.T (%)
<i>Abies religiosa</i>	19	0.46 ± 0.03
<i>Abies religiosa-Pinus hartwegii</i>	8	0.48 ± 0.04
<i>Pinus hartwegii</i>	16	0.52 ± 0.03
<i>Pinus hartwegii-Abies religiosa</i>	8	0.50 ± 0.02
Altitud (msnm)		
2500 - 3000	12	0.41 ± 0.02
3000 - 3400	11	0.49 ± 0.05
3400 - 3800	28	0.51 ± 0.02
Orientación		
Norte	9	0.52 ± 0.04
Noreste	6	0.38 ± 0.07
Este	9	0.49 ± 0.03
Sureste	8	0.51 ± 0.04
Sur	5	0.46 ± 0.06
Oeste	6	0.46 ± 0.03
Noroeste	8	0.47 ± 0.06
Suma		0.48 ± 0.01

En cuanto a la vegetación los promedios del N total muestran una ligera variación entre las clases de *A. religiosa* (0.46%) y *P. hartwegii* (0.52%), a pesar de ello no se encontraron diferencias significativas entre las clases, una vez más los promedios muestran una tendencia a aumentar y disminuir dependiendo de la vegetación. Fenn *et al* (2006), observó diferencias en el contenido de Nitrógeno total entre algunas especies arbóreas en sitios cercanos (Desierto de los leones, Ajusco) a la CRM, las cuales se explican por el hecho del tipo y cantidad de hojarasca que aportan al suelo, la cual es determinante en el contenido N. Sin embargo el comportamiento del N total en le CRM sigue siendo incierta, son necesarios estudios posteriores sobre el tipo y

tasa de descomposición del N en el suelo a diferentes profundidades, para poder determinar su disponibilidad y comportamiento.

En el caso de la orientación de la pendiente, se observaron los mayores intervalos (0.14%) entre el promedio mínimo y máximo, sin embargo no se encontraron diferencias significativas entre las orientaciones, los promedios mayores corresponden a las clases Norte (0.52%) y Sureste (0.51%) y los mínimos a las clases Sur y Oeste (0.46%). No se observa una tendencia en los datos, lo cual complica su análisis, las concentraciones de N total por tipo de orientación resultaron muy homogéneas, se esperaban diferencias entre las clases debido a las discrepancias en los regímenes de temperatura, humedad y radiación solar en las orientaciones. Un número mayor de sitios de muestreo por clase de orientación podría despejar dudas.

5.3.7 Mapa de Distribución

Los valores del porcentaje de N (Fig. 27) tienen como mínimo un intervalo de 0.2-0.3 % y un máximo de 0.7-0.8%, en el mapa la tendencia del N total a aumentar no es tan clara, sin embargo si se observa que la mayoría de las áreas con las concentraciones más altas se encuentran a una mayor altitud (zona Sur-Suroeste), y las más bajas en la parte con menor altitud (zona Noreste). Referente a la interpolación se observa un comportamiento muy marcado de isla (áreas aisladas) en las zonas medias de la CRM, reflejando una alta variabilidad espacial en un trayecto corto, lo que en mayor parte puede ser ocasionado por una baja densidad de sitios de muestreo y una distancia no adecuada entre sitios para la variable medida (Giraldo, 2002). El mapa de los errores de la predicción (Anexo III.C) muestra las áreas con menor error en las zonas medias de la cuenca, y el mayor error en una porción amplia de la parte Sur-Sureste, debido principalmente a una menor cantidad de sitios de muestreo en esa zona. A partir del semivariograma (Anexo I.B), el mapa de distribución y el de errores de la predicción se observa que las distancias de muestreo para el N total deben de ser menores y la red de muestreo más densa, ya que con el diseño de muestreo utilizado no se aprecia del todo el comportamiento de la variable.

5.3.8 Relación C/N

La relación C/N muestra variaciones en sus promedios en las diferentes clases de las variables ambientales, mostrando algunas tendencias en los datos (Cuadro 22). El promedio para la CRM es de 14.5, el cual es relativamente estable y según Moreno (1978) es medio y muy cercano a alto, en general la relación C/N es más alta con respecto a otros suelos minerales, debido principalmente al alto contenido de MOS y N total en los suelos de tipo andosol (Shoji *et al*, 1993). En el caso de la altitud se observan diferencias significativas ($p=0.033$) entre la clase baja (13.1) y clase alta (15.1), observando una variación en la relación C/N dependiente de la altitud. Wagai *et al* (2008) y Campos *et al* (2007) observaron un comportamiento similar en andosoles superficiales, donde la altitud y el material parental tienen una función determinante en la relación C/N, principalmente por el hecho de que las tasas de mineralización de la MOS se relacionan con las diferentes variables ambientales.

Respecto a las clases de vegetación, la relación C/N presenta diferencias significativas ($p=0.352$) entre la clase de *A. religiosa* (14) y *P. hartwegii* (15.6), mostrando poca variación en las clases restantes, de tal forma que se observa una variación dependiente del tipo de vegetación en los promedios de la relación C/N.

Porcentaje de Nitrógeno total del horizonte superficial en la cuenca del río Magdalena

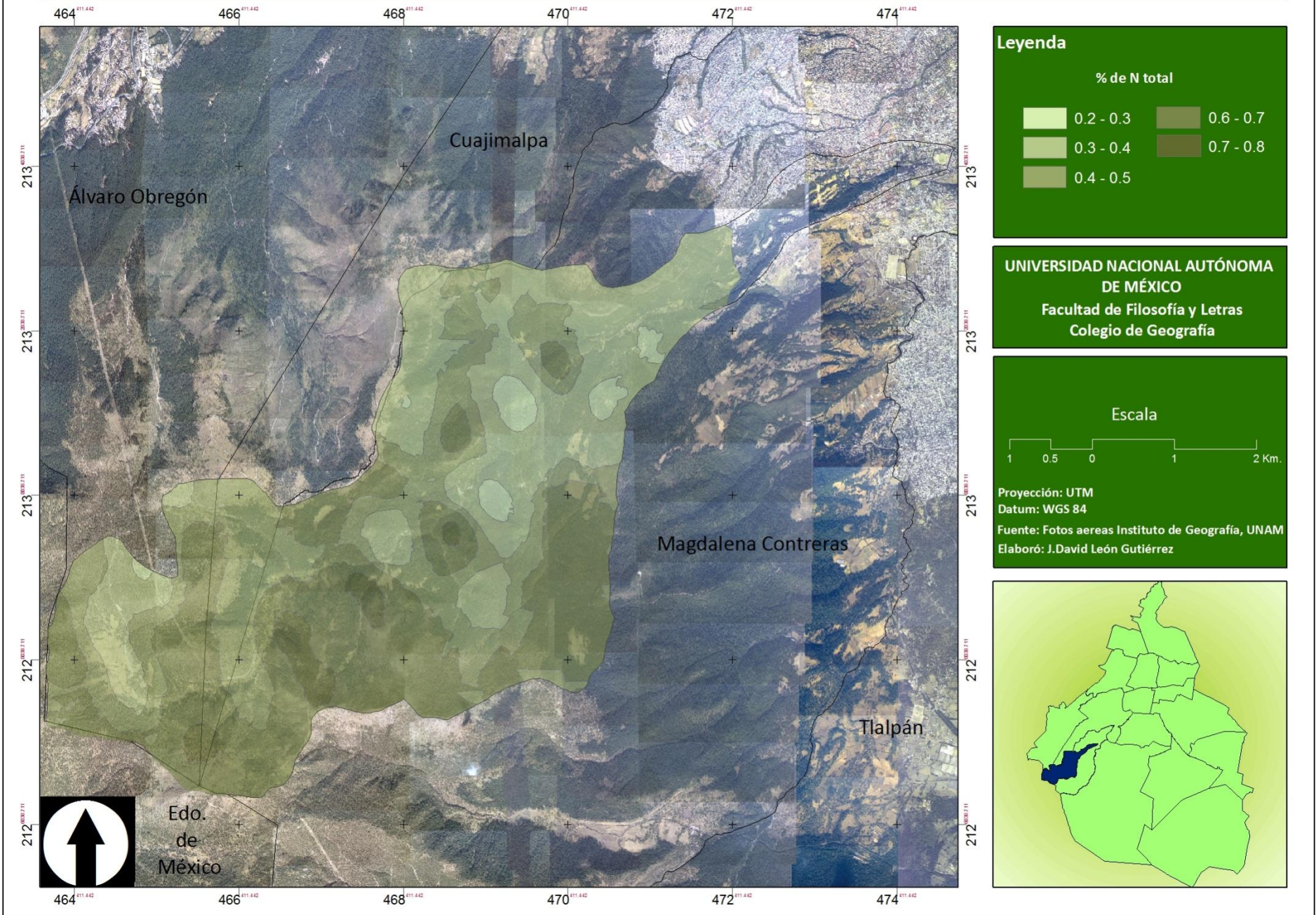


Fig. 28 Mapa del porcentaje de Nitrógeno del horizonte superficial en la cuenca del río Magdalena.

Cuadro 22. Promedios de la relación C/N con su error estándar para cada una de las variables ambientales.

Vegetación	N=	C/N
<i>Abies religiosa</i>	19	14.0 ± 0.6 a
<i>Abies religiosa-Pinus hartwegii</i>	8	14.1 ± 0.5 a
<i>Pinus hartwegii</i>	16	15.6 ± 0.4 b
<i>Pinus hartwegii-Abies religiosa</i>	8	14.2 ± 0.4 a
Altitud (msnm)		
2500 – 3000	12	13.1 ± 0.6 a
3000 – 3400	11	14.6 ± 0.9 b
3400 – 3800	28	15.1 ± 0.3 b
Orientación		
Norte	9	14.7 ± 0.7
Noreste	6	13.5 ± 0.4
Este	9	14.3 ± 0.7
Sureste	8	14.9 ± 0.7
Sur	5	16.5 ± 0.5
Oeste	6	14.0 ± 0.8
Noroeste	8	14.3 ± 0.7
Suma		14.5 ± 0.3

**Letras diferentes entre las filas denotan diferencias significativas al $P < 0.05$, Fisher's LSD.*

En los promedios de la orientación de la pendiente la relación C/N no muestra diferencias significativas, sin embargo se advierten algunas variaciones en las diferentes clases, encontrándose los promedios mayores en las orientaciones Sur (16.5) y Sureste (14.9) y las menores en las orientaciones Noreste (13.5) y Oeste (14.0), observándose una diferencia evidente (3) entre el mayor y menor promedio. La pequeña diferencia entre las orientaciones pueden atribuirse a una nula interacción entre la relación C/N y la orientación de la pendiente, sin embargo el número de muestreos no es lo suficientemente grande como para poder afirmar dicha premisa, pocos trabajos han reportado una correlación (Tatsuhara y Kurashige 2001; Griffiths *et al*, 2009). En la CRM se esperaba que dicha correlación existiera, o al menos se notara una tendencia, sin embargo como en el caso de la MOS, COT y N total no fue así, un muestreo dirigido al tipo de orientación es necesario para obtener mayores respuestas.

5.3.9 Capacidad de Intercambio Catiónico

La CIC y los cationes intercambiables muestran variaciones apreciables en las diferentes variables ambientales, observando algunas tendencias en los promedios (Cuadro 23). Como se mencionó anteriormente para suelos de origen volcánico los contenidos de Al^{3+} intercambiable son bajos, influyendo en una relación negativa entre la altitud y la CIC, y sugiriendo una mayoría de cargas negativas en la solución del suelo conforme se incrementa la altitud. Una baja CIC resulta en una limitada capacidad del suelo a retener nutrientes contra la lixiviación, a amortiguar el pH y a filtrar contaminantes (Zehetner y Miller, 2006). La proporción de los cationes intercambiables siguieron la tendencia de $Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^{+} > Na^{+}$ en las diferentes variables ambientales, la cual ha sido reportada para el mismo tipo de suelo en otros trabajos (Campos *et al*, 2007; Prado *et al*, 2007; Seibert

et al, 2007; Yimer et al, 2006), los contenidos de Mg^{2+} y K^+ pueden deberse a la similaridad del material parental en el área de estudio, las bajas concentraciones de Na usualmente se deben al hecho de que es el más móvil y tiende a lixiviarse (Prado et al, 2007).

En el caso de la altitud se encontraron diferencias significativas ($p= 0.003$) en la CIC entre la clase baja (5.9 cmol/Kg) y la clase alta (3.2 cmol/Kg), así como en el caso del Ca^{2+} ($p= 0.011$) presentándose diferencias entre las clases baja (4.9 cmol/Kg) y alta (2.5 cmol/Kg). El resto de los cationes no presentaron diferencias significativas entre las clases, sin embargo se observan tendencias en los promedios que indican una variación dependiente de la altitud. Tanto el Na^+ (0.059 cmol/kg), el K^+ (0.51 cmol/kg) y el Mg^{2+} (0.57 cmol/kg) presentan su mayor promedio en la clase baja, así como su menor promedio en la clase de alta, Na^+ (0.041 cmol/kg), K^+ (0.29 cmol/kg) y Mg^{2+} (0.40 cmol/kg). Campos et al (2007) menciona una relación negativa en andosoles entre la CIC y la altitud, misma que atribuye a los cambios en el pH y el régimen de humedad del suelo; Santibáñez (2009) encontró una relación negativa del K^+ con la altitud en el bosque de *A. religiosa* en la CRM, explicada principalmente por las diferencias en precipitación y temperatura. Seibert et al (2007) reporta para andosoles una relación negativa de la CIC y sus cationes con la altitud, atribuida a diferencias en la temperatura y humedad del suelo, las cuales influyen en la tasa de mineralización y de intemperización del suelo.

Cuadro 23. Promedios de la CIC y los cationes intercambiables con su error estándar para cada una de las variables ambientales.

Vegetación	N=	CIC (cmol/kg)	Na^+ (cmol/kg)	K^+ (cmol/kg)	Ca^{2+} (cmol/kg)	Mg^{2+} (cmol/kg)
<i>Abies religiosa</i>	19	5.4 ± 0.6 a	0.056 ± 0.006	0.46 ± 0.06	4.4 ± 0.5 a	0.56 ± 0.09
<i>Abies religiosa-Pinus hartwegii</i>	8	4.6 ± 0.6 a	0.054 ± 0.006	0.32 ± 0.09	3.8 ± 0.7 a	0.51 ± 0.08
<i>Pinus hartwegii</i>	16	2.4 ± 0.4 b	0.018 ± 0.007	0.25 ± 0.07	1.8 ± 0.3 b	0.20 ± 0.08
<i>Pinus hartwegii-Abies religiosa</i>	8	2.7 ± 0.7 b	0.044 ± 0.007	0.37 ± 0.05	2.0 ± 0.5 b	0.37 ± 0.03
Altitud (msnm)						
2500 - 3000	12	5.9 ± 1.1 a	0.058 ± 0.007	0.51 ± 0.09	4.9 ± 0.9 a	0.57 ± 0.08
3000 - 3400	11	4.8 ± 0.6 a	0.058 ± 0.012	0.41 ± 0.02	3.7 ± 0.5 a	0.44 ± 0.09
3400 - 3800	28	3.2 ± 0.3 b	0.041 ± 0.005	0.29 ± 0.05	2.5 ± 0.3 b	0.40 ± 0.08
Orientación						
Norte	9	3.9 ± 1.0	0.046 ± 0.008	0.46 ± 0.06	3.0 ± 0.9	0.29 ± 0.06
Noreste	6	3.0 ± 0.7	0.056 ± 0.009	0.28 ± 0.07	2.3 ± 0.6	0.33 ± 0.08
Este	9	5.2 ± 1.1	0.037 ± 0.008	0.30 ± 0.08	4.1 ± 1.0	0.77 ± 0.06
Sureste	8	4.2 ± 0.7	0.050 ± 0.010	0.48 ± 0.09	3.3 ± 0.6	0.38 ± 0.08
Sur	5	5.1 ± 1.1	0.043 ± 0.009	0.51 ± 0.10	4.1 ± 1.0	0.41 ± 0.09
Oeste	6	4.1 ± 1.0	0.062 ± 0.009	0.28 ± 0.09	3.0 ± 0.9	0.72 ± 0.09
Noroeste	8	4.0 ± 0.7	0.052 ± 0.008	0.37 ± 0.08	3.3 ± 0.6	0.27 ± 0.04
Suma		4.2 ± 0.3	0.048 ± 0.004	0.36 ± 0.04	3.3 ± 0.3	0.45 ± 0.06

*Letras distintas en las columnas denotan diferencias significativas al $p < 0.05$, Fisher's LSD.

Respecto a la vegetación se presentan diferencias significativas ($p= 0.006$) en la CIC, específicamente entre la clase de *A. religiosa* (5.4 cmol/kg) y *P. hartwegii* (2.4 cmol/kg); el Ca también muestra diferencias ($p= 0.007$) entre *A. religiosa* (4.9 cmol/kg) y *P. hartwegii* (2.5 cmol/kg). El resto de los cationes no presentaron diferencias significativas entre las clases, sin embargo se observan tendencias en los promedios que indican una variación

dependiente de la vegetación. Tanto el Na^+ (0.056 cmol/kg), el K^+ (0.46 cmol/kg) y el Mg^{2+} (0.56 cmol/kg) presentan su mayor promedio en la clase de *A. religiosa*, así como su menor promedio en la clase de *P. hartwegii*, Na^+ (0.018 cmol/kg), K^+ (0.25 cmol/kg) y Mg^{2+} (0.37 cmol/kg). Santibáñez (2009), reporta valores de K^+ para el bosque de *A. religiosa* en la CRM de 0.73 ± 0.29 los cuales son muy similares a los encontrados en el presente trabajo. Algunos autores (Campos *et al*, 2007; Seibert *et al*, 2007; Wei *et al*, 2008), han encontrado relaciones entre la CIC y las vegetación, atribuyéndolas principalmente a las diferencias en la altitud, el grado de intemperización del material parental y el clima.

La orientación de la pendiente no presenta diferencias significativas en las clases, a pesar de ello se observan cambios evidentes en la CIC y los cationes. En el caso de la CIC el mayor promedio se encuentra en la orientación Este (5.2 cmol/kg) y el menor en la Noreste (3.0 cmol/kg), específicamente el Na^+ presenta el promedio mayor en la clase Noreste (0.056 cmol/kg) y el menor en la Este (0.037 cmol/kg); el K^+ tiene un promedio mayor en la orientación Sur (0.51 cmol/kg) y menor en la Noreste (0.28 cmol/kg); el promedio de Ca^{2+} es mayor en la orientación Este y Sur (4.1 cmol/kg) y menor en la Noreste (2.3 cmol/kg); y por último el Mg^{2+} presenta un promedio mayor en la Este (0.77 cmol/kg) y menor en la Norte (0.29 cmol/kg). Pocos estudios reportan relaciones entre el tipo de orientación y la CIC, Yimer *et al* (2006) encontró diferencias significativas para todos los cationes en diferentes orientaciones, atribuyéndolo principalmente a las diferencias en pH y grado de exposición solar. Wei *et al* (2008) reporta una relación ente el contenido de Ca^{2+} y Mg^{2+} dependiente del tipo de orientación, atribuyéndolo a los cambios en pH en las diferentes orientaciones. En el caso de la CRM puede ser que no se noten diferencias debido a la escala local del estudio, o a una baja intensidad de muestreo en las diferentes orientaciones.

5.3.9 Mapas de distribución

El mapa de la CIC (Fig. 28) muestra un intervalo de 2 a 12 cmol/Kg, se observa una variabilidad a lo largo de un gradiente Noreste-Suroeste con mayores concentraciones en la parte alta de la CRM. El semivariograma (Anexo I.C) muestra una alta correlación espacial entre los sitios de muestreo, lo que explica el marcado gradiente de concentración, lo que además indica que la distancia y el número de puntos de muestreo para la interpolación de la CIC fue la correcta (Giraldo, 2000; Sommer *et al*, 2000). En el mapa de errores de la predicción (Anexo III. D) se observa la mayor incertidumbre en la parte baja de la cuenca y en la zona Noroeste, por el contrario la zona media y alta fueron las mejores representadas.

El mapa de Na^+ (Fig.29) muestra poca variabilidad y contenidos muy bajos, oscilando en un intervalo de 0.01 a 0.1 cmol/Kg, en general la menor concentración se encuentra en las partes bajas y medias de la CRM y las mayores en la parte alta. El semivariograma (Anexo I.C) indica una correlación espacial fuerte, sin embargo las concentraciones son tan pequeñas que dicha variación no ofrece consecuencias importantes al suelo. Respecto al K^+ se observa un gradiente muy marcado en dirección Noreste-Suroeste, presentando valores mayores en la parte alta de la CRM y menores en la parte baja, oscilando en un intervalo de 0.2 a 1.0 cmol/Kg, de acuerdo al semivariograma (Anexo I.C) se observa una alta correlación espacial lo que indica que el muestreo realizado explica adecuadamente el fenómeno estudiado (Villatoro *et al*, 2008).

El mapa de Ca (Fig. 31) también muestra un gradiente muy evidente en sus concentraciones, lo cual se observa en el semivariograma (Anexo I. C) el cual indica una fuerte correlación espacial, las zonas más altas de la CRM presentan la mayor concentración de Ca^{2+} y las más bajas la menor con un intervalo de 1.0 a 7.0 cmol/Kg.

Capacidad de intercambio catiónico en el horizonte superficial de la cuenca del río Magdalena

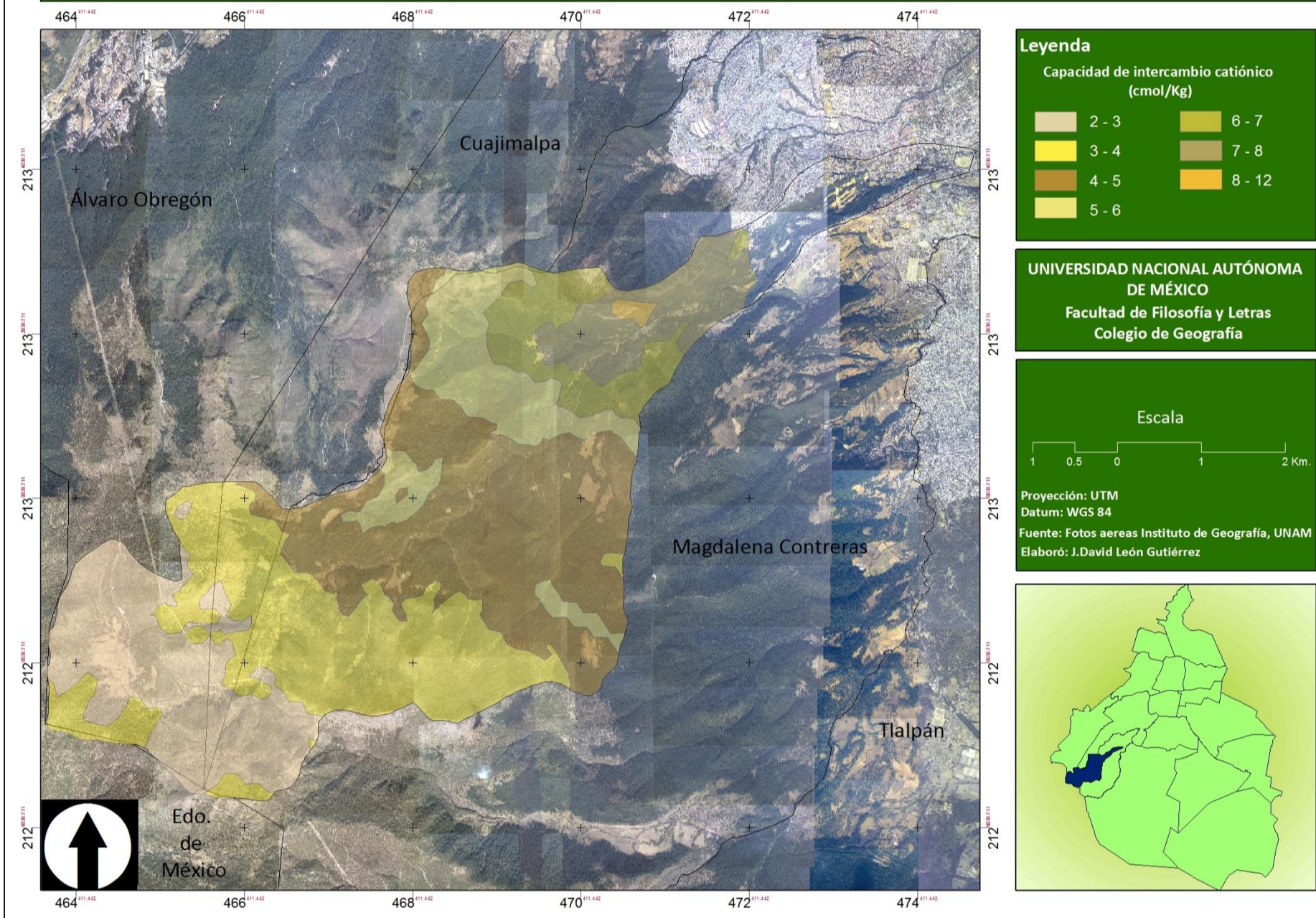


Fig. 29 Mapa de la capacidad de intercambio catiónico del horizonte superficial en la cuenca del río Magdalena.

Sodio intercambiable del suelo en la cuenca del río Magdalena

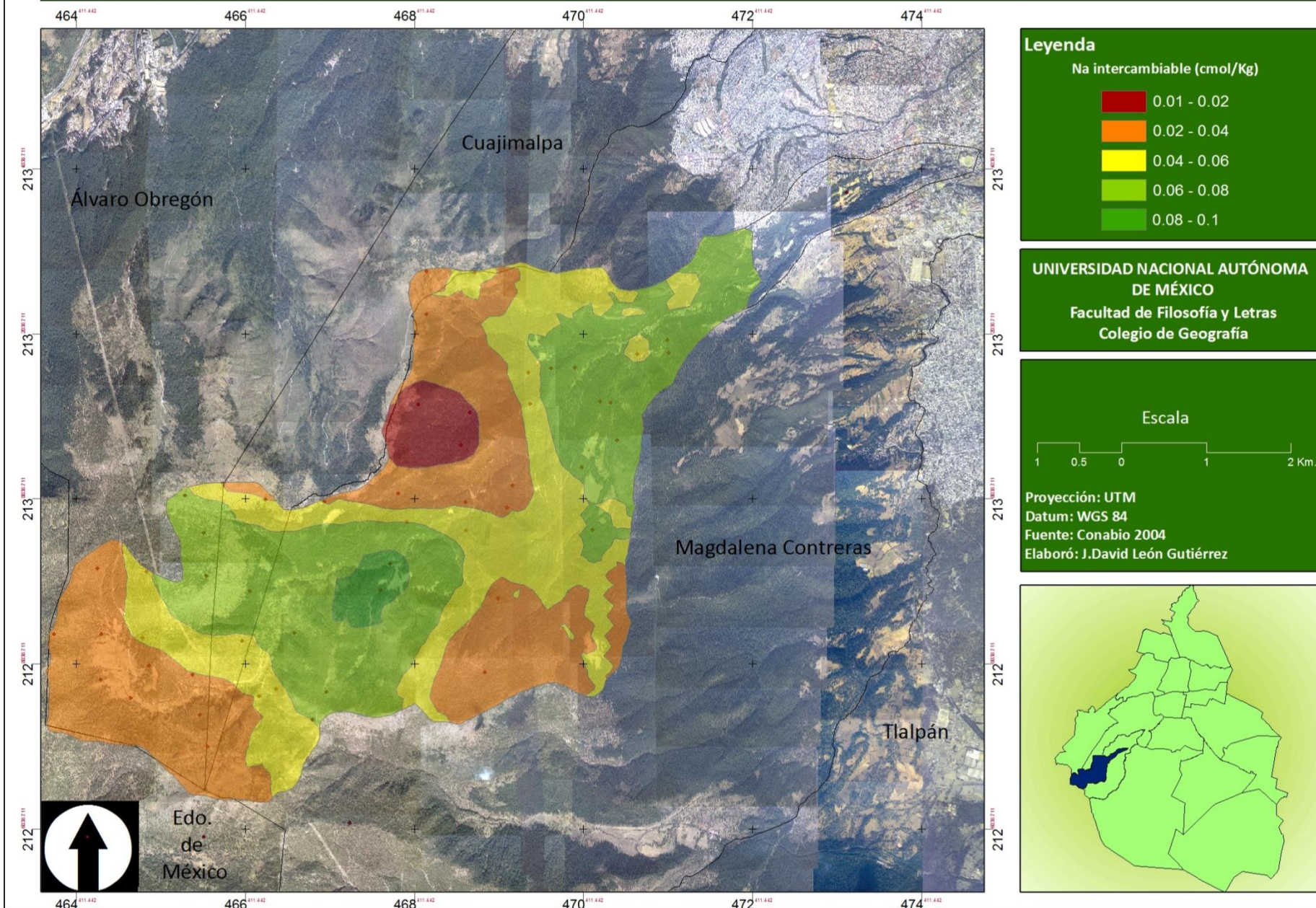


Fig. 30 Mapa del Sodio intercambiable del horizonte superficial en la cuenca del río Magdalena.

Potasio intercambiable del suelo en la cuenca del río Magdalena

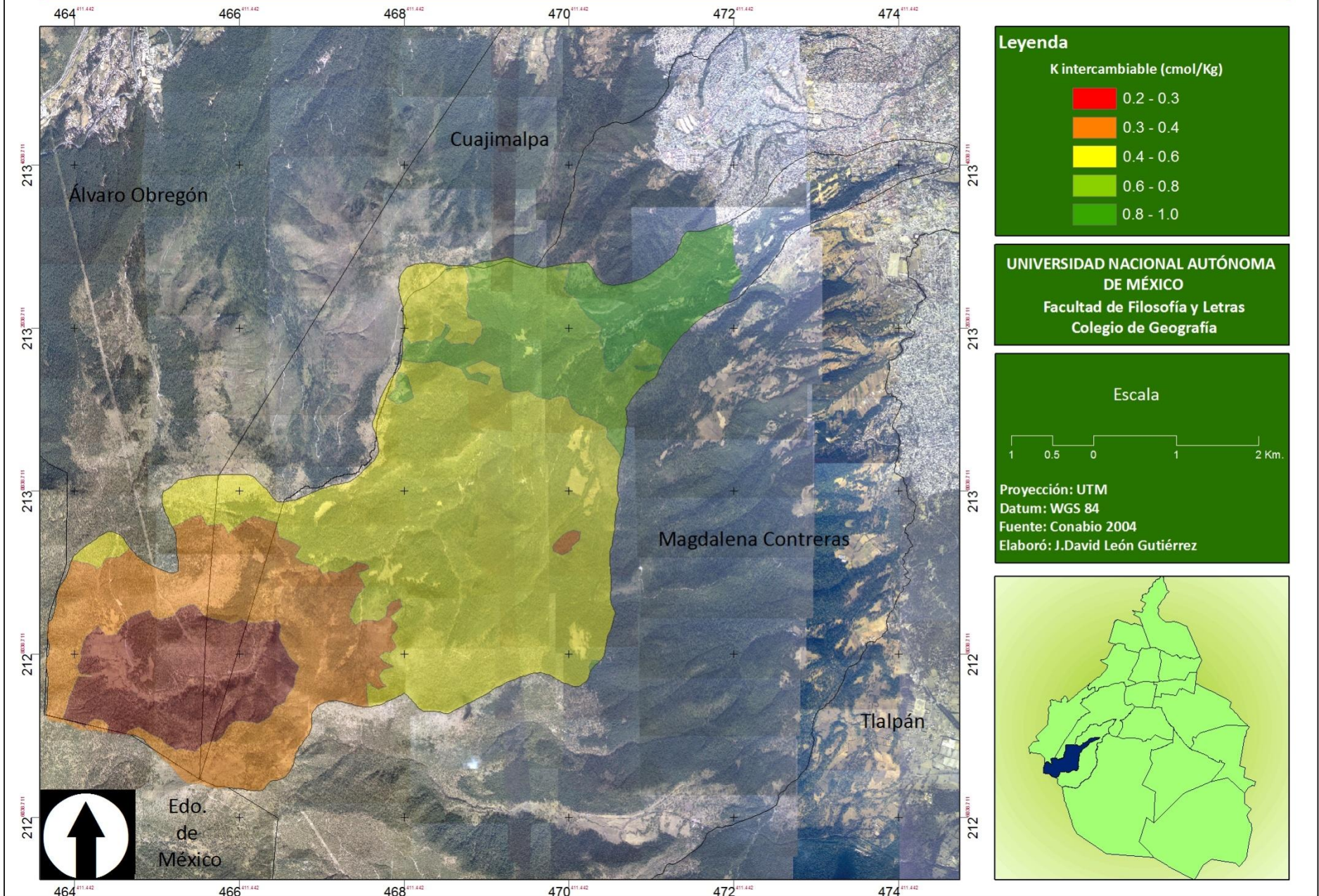


Fig. 31 Mapa del Potasio intercambiable del horizonte superficial en la cuenca del río Magdalena.

Calcio intercambiable del suelo en la cuenca del río Magdalena

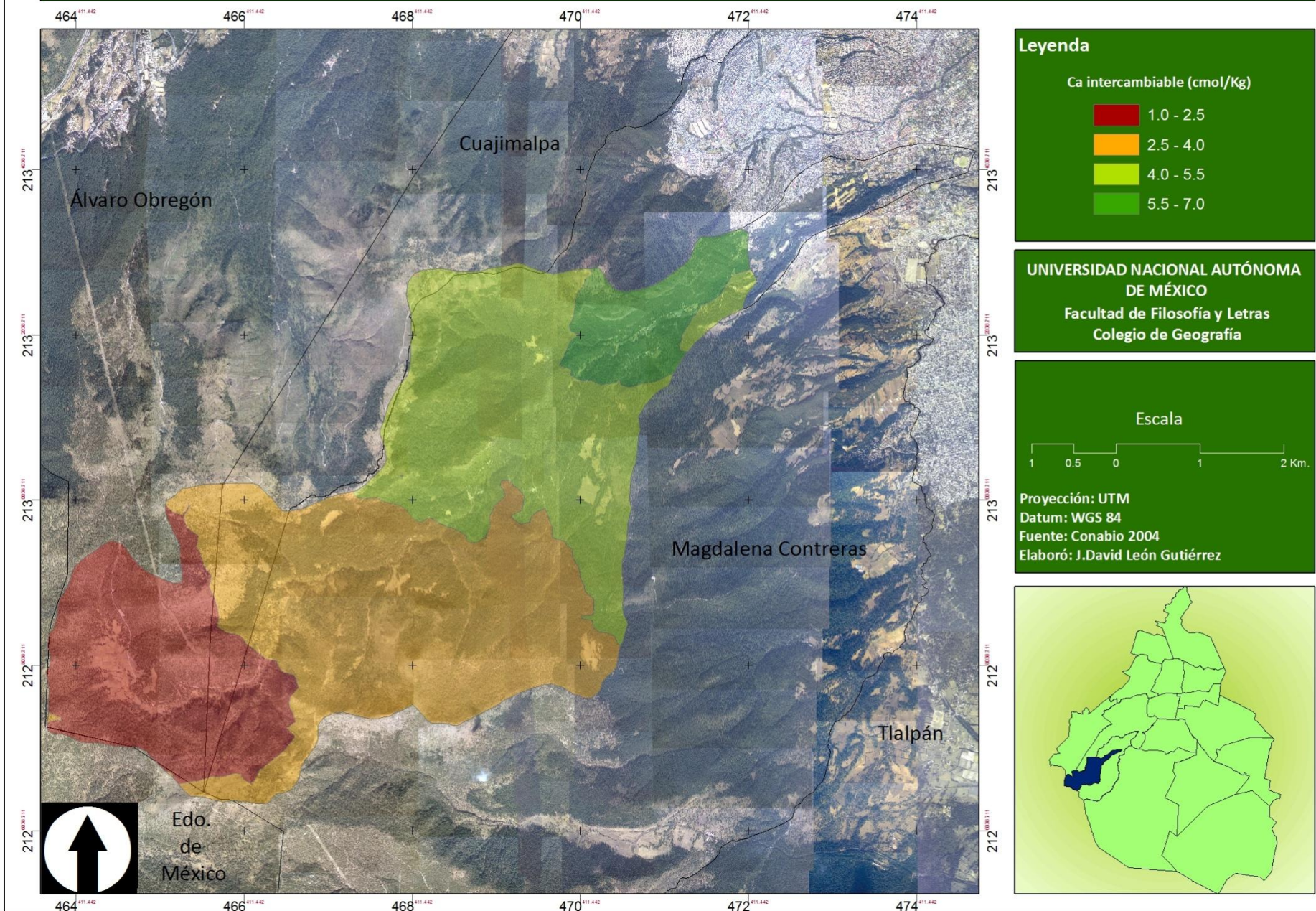


Fig. 32 Mapa del Calcio intercambiable del horizonte superficial en la cuenca del río Magdalena.

Magnesio intercambiable del suelo en la cuenca del río Magdalena

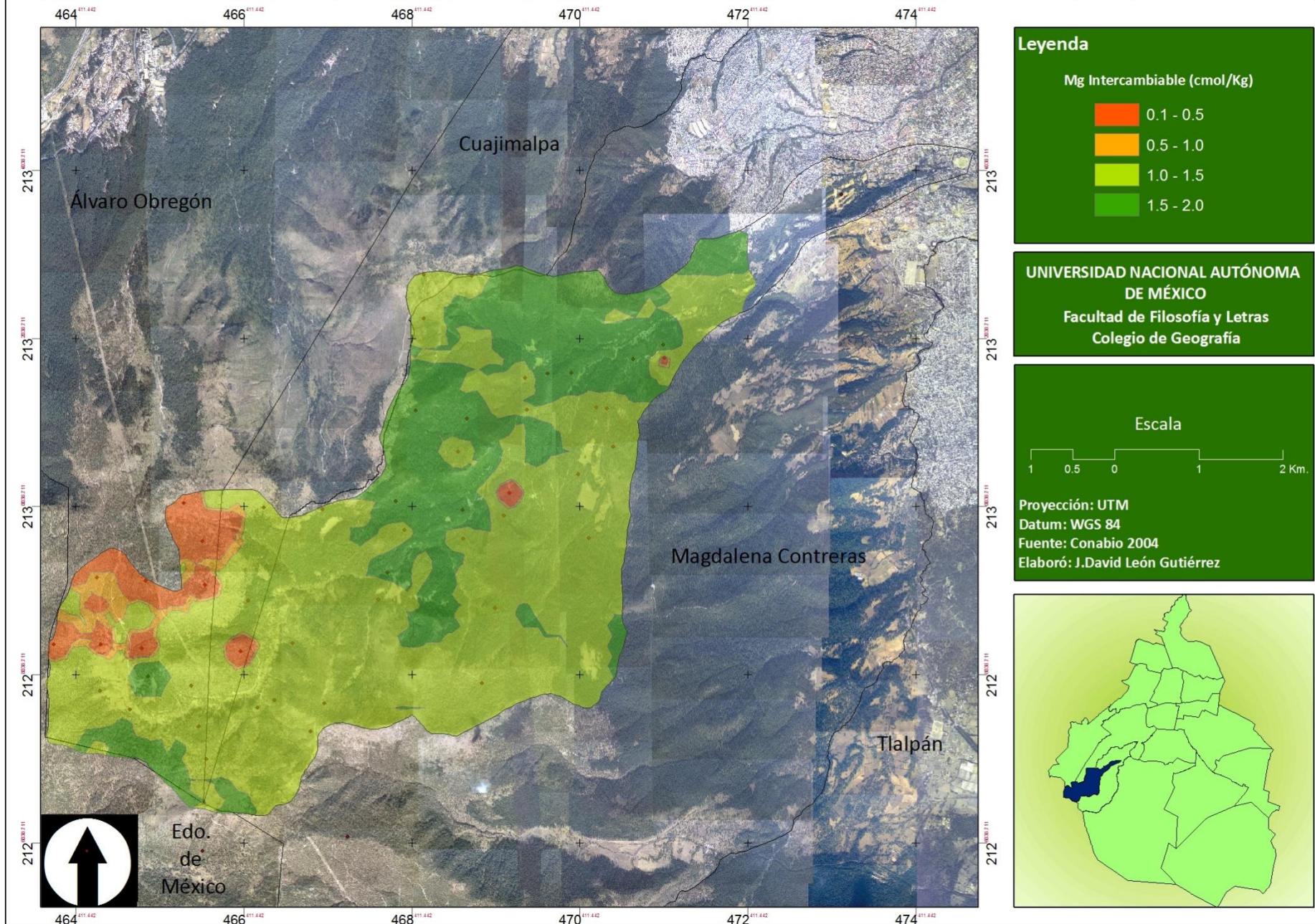


Fig. 33 Mapa del Magnesio intercambiable del horizonte superficial en la cuenca del río Magdalena.

Por último en el mapa de Mg^{2+} (Fig. 32) se observan concentraciones muy homogéneas con un intervalo pequeño de 0.1 a 2.0 cmol/Kg, lo cual se refleja en el semivariograma (Anexo I.C), donde se nota una débil correlación espacial, de manera general las menores concentraciones de Mg^{2+} se encuentran en la parte alta de la CRM, particularmente se observaron concentraciones muy bajas en algunos sitios de muestreo, lo que ocasionó que se observaran zonas de bajos valores muy puntuales dentro del mapa. Respecto a los mapas del error de la predicción (Anexo III. D), las zonas con mayor incertidumbre se encuentran en la parte Noreste y Sur de la CRM, y en mayor medida en los mapas de Na^+ y Mg^{2+} , lo que podría explicarse por una baja cantidad de sitios de muestreo en esas áreas además de existir poca variabilidad espacial en esas propiedades.

5.4 Correlaciones entre las propiedades del suelo

Las relaciones entre las diferentes variables ambientales y las propiedades fisicoquímicas del horizonte superficial fueron obtenidas mediante el coeficiente de correlación de Spearman (r); los resultados obtenidos se muestran en el cuadro 24.

Se encontraron correlaciones significativas en todas las variables, a excepción del fósforo, el cual no parece relacionarse con el resto de las propiedades. De manera general, la altitud muestra una mayor relación con las propiedades físico-químicas en comparación con la vegetación y la orientación de la pendiente. Respecto a las propiedades del suelo, el porcentaje de humedad, el pH (H_2O y KCl), COT y la MOS, son las que presentan mayor correlación con el resto de las variables y propiedades del suelo.

La altitud muestra una correlación más fuerte con la vegetación. Santibáñez (2009) menciona que la altitud es un factor determinante en la distribución y composición del bosque de *A. religiosa*; por lo que, en general, se puede asumir que la vegetación está altamente influenciada por la altitud. Como se observó en la estadística descriptiva y los mapas de distribución, la altitud presenta correlaciones con todas las propiedades medidas a excepción de la densidad aparente, P disponible y Na^+ . Es importante notar que la orientación de la pendiente sólo muestra una correlación significativa con el tipo de textura, la cual no fue apreciable por medio de la estadística descriptiva y la geoestadística; estudios más detallados podrían aclarar si existe una relación entre estas variables.

Respecto a las propiedades del suelo, % de humedad parece tener una influencia importante sobre la mayoría de las variables medidas, relacionándose con la mayoría de las propiedades a excepción del P disponible, la densidad aparente, la relación C/N y el Na^+ . La humedad del suelo se ha reportado (Dai y Huang, 2006; Tsui *et al*, 2004) como uno de los factores determinantes en los procesos que se llevan a cabo en el suelo, contribuyendo en la tasa de mineralización de la MOS, la lixiviación de nutrientes, y el grado de intemperismo del material parental.

Es importante destacar la importancia de las fracciones de partícula del suelo; tanto el % de arcillas como el % de arenas mostraron correlación de manera importante con propiedades como la MOS, el COT, el N, la densidad real y el Na^+ , lo que algunos autores (Dai y Huang, 2006; Prado *et al*, 2007; Yimer *et al*, 2007) atribuyen a la cantidad de materia orgánica asociada a las arcillas en los suelos de tipo andosol.

El pH del suelo parece ser determinante en la dinámica de algunas propiedades como la MOS, el COT, el N, la CIC, el Ca^{2+} y el K^+ . El pH ácido característicos de los andosoles han sido reportados en diversos trabajos (Tsui *et al*, 2004; Wagai *et al*, 2007; Zehetner y Miller, 2006) como limitantes de la CIC debido a la presencia de Al^+ y Fe^+ intercambiable, además de contribuir en la mineralización de la MOS.

Cuadro 24. Coeficientes de correlación (*r*) para las relaciones entre las diferentes variables ambientales y propiedades fisicoquímicas de los sitios de estudio (*n*=51).

Parámetro	Veg	Alt	Orien	Hum	Tex	Arc	Lim	Are	P	pH H2O	pH KCl	C.E	D.R.	D.A.	Poros	COT	M.O.	N	C/N	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	
Alt	0.636**																							
Orien	-0.135	0.162																						
Hum	0.360*	0.415**	-0.165																					
Tex	-0.022	0.343*	-0.328*	0.338**																				
Arc	0.323*	0.309*	-0.199	0.628**	0.346*																			
Lim	0.147	0.308*	-0.077	0.420**	0.353*	0.483**																		
Are	-0.165	-0.286*	0.151	-0.558**	-0.366**	-0.764**	-0.884**																	
P	-0.168	-0.119	-0.064	-0.169	0.053	0.005	0.152	-0.106																
pH H2O	-0.402**	-0.584**	-0.079	-0.438**	-0.362**	-0.243	-0.073	0.141	0.160															
pH KCl	-0.349*	-0.564**	-0.069	-0.522**	-0.139	-0.179	-0.228	0.218	0.070	0.781**														
C.E	-0.336*	-0.309*	0.088	-0.372**	-0.102	-0.155	-0.003	0.053	0.109	0.313*	0.424**													
D.R.	-0.266	-0.402**	0.111	-0.933**	-0.355*	-0.610**	-0.428**	0.567**	0.179	0.369**	0.445**	0.386**												
D. A.	-0.006	0.074	0.002	-0.224	0.238	-0.007	-0.086	0.095	-0.025	-0.008	0.073	0.072	0.279											
Por	-0.037	-0.320*	0.135	-0.476**	-0.475**	-0.431**	-0.115	0.226	0.264	0.274	0.219	0.216	0.467**	-0.608**										
C.O.T	0.264	0.506**	-0.018	0.470**	0.199	0.323*	0.298*	-0.369**	-0.032	-0.389**	-0.397**	-0.193	-0.525**	-0.001	-0.336**									
M.O.	0.264	0.506**	-0.018	0.470**	0.199	0.323*	0.298*	-0.369**	-0.032	-0.389**	-0.397**	-0.193	-0.525**	-0.001	-0.336**	1								
N	0.203	0.415**	-0.069	0.481**	0.243	0.293*	0.242	-0.299*	-0.043	-0.381**	-0.343*	-0.136	-0.542**	-0.080	-0.303**	0.926**	0.926**							
C/N	0.362**	0.495**	0.123	0.182	0.100	0.244	0.378**	-0.391**	0.010	-0.170	-0.245	-0.180	-0.176	0.182	-0.190	0.490**	0.490**	0.160						
Ca ²⁺	-0.430**	-0.355*	0.145	-0.367**	-0.168	-0.027	0.081	-0.071	0.157	0.527**	0.496**	0.508**	0.154	-0.038	0.153	-0.035	-0.035	-0.015	-0.108					
Mg ²⁺	-0.452**	-0.320*	0.077	-0.320*	0.068	0.044	0.033	-0.021	0.049	0.221	0.290	0.375**	0.266	0.062	0.134	-0.140	-0.140	-0.041	-0.236	0.57**				
Na ⁺	-0.263	-0.178	0.129	-0.003	-0.314*	-0.311*	-0.144	0.217	-0.046	0.055	-0.109	0.051	-0.015	-0.167	0.091	-0.127	-0.127	-0.14	-0.094	0.107	-0.184			
K ⁺	-0.312*	-0.331*	0.103	-0.510**	-0.308*	-0.257	-0.091	0.182	0.084	0.601**	0.577**	0.587**	0.422**	0.033	0.251	-0.246	-0.246	-0.31**	0.006	0.614**	0.228	0.097		
CIC	-0.44**	-0.381**	0.144	-0.399**	-0.133	-0.02	0.073	-0.057	0.126	0.531**	0.546**	0.546**	0.205	-0.011	0.152	-0.095	-0.095	-0.071	-0.125	0.984**	0.653**	0.069	0.646**	

Significante al: **P*<0.05, ***P*<0.01

Veg: vegetación; Alt: altitud; Orien: orientación; Hum: humedad; Tex: textura; Arc: arcillas; Lim: limos; Are: arenas; P: Fósforo; C.E: conductividad eléctrica; D.R: densidad real; D.A: densidad aparente; Por: porosidad; COT: carbono orgánico total; M.O: materia orgánica; N: nitrógeno; C/N: relación carbono-nitrógeno; Ca²⁺: Calcio; Mg²⁺: Magnesio; Na⁺: Sodio; K⁺: Potasio.

VI. CONCLUSIONES

En estudios previos realizados en la CRM donde se involucra al suelo, no se había tenido una cobertura amplia del área de estudio. En este trabajo se realizó una cobertura lo más amplia posible de la CRM, sentando una base del comportamiento de algunas de las propiedades físico-químicas en los primeros 30 cm del suelo. Respecto al diseño de muestreo anidado es importante destacar que el número de sitios resultó ser suficiente (más no el óptimo) para casi todas las variables; en el caso de la orientación de la pendiente, la densidad real, densidad aparente y el P disponible el número de sitios de muestreo resultaron ser insuficientes. Una red de sitios de muestreo más densa sería eventualmente necesaria para establecer la dependencia espacial a un nivel más local, dado que los resultados que aquí se presentan son válidos únicamente a una escala más regional. Las limitaciones del muestreo se observaron en la falta de sitios en áreas fuera de la CRM para así generar una superficie de interpolación de mayor calidad y un diseño inadecuado para captar las variaciones en la orientación de la pendiente. Además de que en la manera de lo posible, se debe contar con una mayor cantidad de sitios en las zonas colindantes al área de estudio para así reducir el error en las zonas límite de la CRM.

El horizonte superficial del suelo muestra claras variaciones a lo largo del gradiente altitudinal de la CRM. La vegetación mostró estar más influenciada por la altitud que por las propiedades del suelo; la orientación de la pendiente no mostró diferencias claras con las diferentes propiedades estudiadas; a pesar de ello, se observaron tendencias en algunas variables como el pH, la MOS y la CIC, las cuales merecen ser estudiadas con mayor detalle a futuro. Es claro que las diferencias en temperatura y precipitación son las principales causas que afectan a las propiedades físico-químicas en la CRM. A mayor altitud, las condiciones frías y de humedad parecen favorecer la acumulación de la MOS y la precipitación de materiales amorfos. Estos últimos deberán de ser analizados a mayor detalle y dentro del perfil del suelo ya que juegan un papel muy importante en la dinámica de las propiedades del suelo en el área de estudio.

La geoestadística, en concreto el método de Kriging ordinario, resultó una herramienta muy útil para determinar la variación espacial de las propiedades determinadas en este trabajo, ya que ésta ofrece un método alternativo a la estadística convencional. Los resultados mostraron que a escala medida existe una correlación espacial en todas las propiedades del suelo, a excepción de la relación C/N. La validación cruzada (por medio del error estándar de la predicción y el error cuadrático medio estandarizado) de los mapas interpolados mostró ser un buen parámetro de la precisión de los mapas, los cuales mostraron mayor incertidumbre en las zonas con menor densidad de muestreo. Es importante señalar que la mayoría de los mapas mostraron un gradiente en las concentraciones coincidente con la altitud. Una limitante del método Kriging es el elevado número de puntos de muestreo que requiere, así como una buena distribución de estos en el espacio para poder generar mapas con poca incertidumbre.

El análisis de correlación de Spearman confirmó a la altitud como el factor más determinante sobre las variables estudiadas; sin embargo, también se notó al % de humedad como una propiedad importante en la dinámica del suelo. Propiedades como el pH, la CIC, la CE, la MOS, el COT, el N y el % de arcillas y arenas mostraron, conforme a lo esperado, estar correlacionadas entre sí y otras, como el P disponible, la densidad aparente y la orientación de la pendiente, contrario a lo esperado, no mostraron una correlación significativa.

El hecho de que la altitud y % de humedad sean los factores más importantes en la dinámica del suelo en sus primeros 30 cm. tiene implicaciones importantes ya que un posible calentamiento global podría disminuir los contenidos de MOS, alterando la capacidad de almacenamiento de COT del suelo, así como cambiar las condiciones de humedad y lixiviación, lo que a su vez podría alterar la composición coloidal de suelo y, por lo tanto, cambiar su comportamiento físico-químico dentro de la CRM. Sería conveniente que se realizaran futuros trabajos donde se estudien a detalle los cambios en las propiedades químicas más sensibles a la temperatura y la precipitación, así como las concentraciones del COT a diferentes profundidades, su relación con el mantillo y el tipo de vegetación.

Evidentemente el método utilizado en este trabajo es perfectible y se puede complementar incorporando un mayor número de sitios de muestreo, así como nuevas variables, principalmente relacionadas con las características típicas de los andosoles (Al^+ y Fe^+ intercambiable, materiales amorfos asociados a las arcillas, mineralización de la MOS y N, etc.), así como las propiedades relacionadas con la parte biológica del suelo, las cuales son de suma importancia.

Consideraciones Finales

La CRM es un área muy estudiada en los últimos años, por tal motivo existen varios trabajos que describen los factores bióticos y abióticos de la zona. A pesar de su cercanía con el área urbana del D.F. la CRM aún provee importantes servicios ambientales, de los cuales destacan la captura de carbono y la provisión y calidad del agua.

Los resultados encontrados en este estudio destacan la importancia de la conservación del recurso del suelo en la CRM; claramente se observa que la mayor parte de los suelos no son aptos para la práctica de la agricultura (pH ácido, baja disponibilidad de nutrientes P, CIC), además el hecho de que exista un gradiente altitudinal en la mayoría de las propiedades físico-químicas concuerda con los gradientes de calidad del agua (Monges, 2009), con los estudios de la calidad de la vegetación ribereña de la cuenca (Briones, 2011), así como con los de autenticidad forestal (Ávila-Akerberg, 2004), en ellos se concuerda que la parte baja de la cuenca es la que se encuentra sometida a una mayor afectación por parte de las actividades humanas, y por lo tanto es la zona que requiere mayor atención para su conservación. Por el contrario la parte alta de la CRM es el área mejor conservada y menos impactada por las actividades humanas, y en el caso de los primeros 30 cm del suelo destaca por ser la zona con mayor contenido de carbono orgánico, por lo que su importancia para prestar dicho servicio ambiental es fundamental.

En este rubro en general en México se está apostando al desarrollo y operación de la venta de bonos de carbono derivados de proyectos forestales, dirigidos a la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero. Lamentablemente aún se desconocen muchas características del mercado de servicios ambientales. Es todavía muy difícil cuantificarlos y darles un precio. En algunos casos los costos de transacción pueden ser prohibitivos si no se trata de unidades de terreno de gran escala. La fragmentación en parcelas pequeñas de las áreas forestales puede acentuar el problema. Otro problema tiene que ver con la tenencia y el productor de los servicios ambientales, aún se considera a éstos como una externalidad, no como un producto generado por los propietarios de los recursos forestales, lo que dificulta el cobro directo por su utilización.

Sin embargo organizaciones como PRONATURA México A.C., está aperturando el mercado voluntario de carbono bonos de carbono, de proyectos forestales que se desarrollan dentro del programa Pago de Servicios Ambientales de Conafor, con un precio de 10 dólares la tonelada de carbono(tCO_2E), siendo una de las mejores opciones para la venta de este servicio ambiental.

El programa neutralizate de Pronatura México A.C., ha concretado la búsqueda de mercados alternos con las ventas de bonos de carbono en el mercado voluntario nacional, que iniciaron en el 2008. Un ejemplo claro es la venta de dichos bonos en localidades del estado de Oaxaca obteniendo importantes ingresos que van desde los 13 mil pesos hasta 1 millón 300 mil pesos, dependiendo del número de hectáreas consideradas y su contenido de carbono; obteniendo ingresos totales aproximados de 3 millones 436 mil pesos por la conservación de 1672.30 hectáreas, dichos ingresos se ven reflejados en la implementación de proyectos productivos que a su vez también benefician a la comunidad. En general el área de la CRM tiene un amplio potencial para la captura de carbono tanto en biomasa aérea, como en el suelo, estudios como el de Galeana (2008) y el presente trabajo son prueba de ello; en el caso de la biomasa aérea se reporta que podrían existir ganancias de hasta 1 millón de pesos si la venta de bonos de carbono se concretara en la zona (Galeana, 2008). Futuros estudios deben de prestar más atención en la cantidad de carbono orgánico que está contenido en el suelo a diversas profundidades para poder entender de mejor manera su dinámica. Lo que es innegable es la importancia de la conservación de los suelos de la zona ya que son los que dan sustento a la vegetación, que a su vez representa una de las fuentes más importantes de incorporación de materia orgánica al suelo; las repercusiones de un eventual cambio de uso de suelo pueden tener importantes impactos en el carbono almacenado en el suelo, Aviña (2007) reporta pérdidas en los almacenes antes diversos escenarios de cambio de cobertura de suelos forestales de Michoacán, inclusive ante la implementación de plantaciones forestales, las cuales pueden tardar hasta 40 años en recuperar sus niveles óptimos. Por lo que la ejecución de proyectos productivos en la CRM debe ser tomada con suma cautela.

El presente trabajo es útil como base del comportamiento de los primeros 30 cm del suelo, conocer dicho comportamiento es útil para futuros estudios que evalúen la viabilidad de la ubicación de plantaciones forestales, invernaderos y actividades ecoturísticas dentro de la cuenca, mismas que permitan el desarrollo comunitario.

Por ende es importante concientizar a los habitantes de la cuenca así como a sus visitantes de la importancia que tiene la conservación del recurso del suelo y los beneficios que éste puede traer al ecosistema y a la comunidad, el pago por servicios ambientales puede ser una opción atractiva para obtener un beneficio económico por medio de la conservación. Estudios como el de Ramos (2009) han probado ser de utilidad en la concientización de la comunidad, sin embargo también es una realidad que es necesario que exista una comunión entre autoridades, sociedad civil y comunidad científica.

REFERENCIAS

- Acevedo-Sandoval, O., F. Prieto-García y A. Gordillo-Martínez. 2008. *Identificar las fracciones de Aluminio en un Andosol del Estado de Hidalgo, México*. Revista de la sociedad geológica de España Vol. 21. pp. 125-132.
- Aguilera, H. N. 1989. *Tratado de Edafología de México*. Tomo 1. Laboratorio de Investigación de Edafología. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 222p.
- Álvarez, K. E. 2000. *Geografía de la educación ambiental: algunas propuestas de trabajo en el bosque de los Dinamos; área de conservación ecológica de la Delegación Magdalena Contreras*. Tesis de Licenciatura en Geografía. Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional Autónoma de México. México. 127p.
- Armstrong, M. 1998. *Basic Linear Geostatistics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Alemania. 154p.
- Artiola, J. F. 2004. *Chemical Properties and Processes*. En: Artiola, J. F.; Pepper, L. y Brusseau, M. Environmental Monitoring and characterization. Elsevier Academic Press. USA. 393p.
- Astier-Calderón, M. 2002. *El efecto de las Leguminosas en el Mejoramiento de la Calidad de los Suelos de Ando en Sistemas Agrícolas de Ladera en la Cuenca del Lago Zirahúen*. Tesis de Doctorado en Biología. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. México. 92p.
- Ávila-Akerberg, V. 2002. *La vegetación de la cuenca alta del río Magdalena: un enfoque florístico, fitosociológico y estructural*. Tesis de Licenciatura en Biología. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. México. 86p.
- Ávila-Akerberg, V. 2004. *Autenticidad de los bosques en la cuenca alta del Río Magdalena: diagnóstico hacia la restauración ecológica*. Tesis de Maestría en Ciencias Biológicas. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. México. 112p.
- Aviña, F. 2007. *Estimación del contenido de carbono en diferentes clases de cobertura vegetal y uso de suelo en la región purépecha, Michoacán*. Tesis de Licenciatura en Biología. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. 76p.
- Ayoubi, Sh., S. Mohammad Zamani y F. Khormali. 2007. Spatial variability of some soil properties for site specific farming in northern Iran. International Journal of Plant Production Vol. 2. pp. 225-236.
- Badillo, J. y R. Rodríguez. 2005. *Mecánica de suelos. Tomo 1. Fundamentos de la mecánica de suelos*. Editorial Limusa. México. 644p.
- Baldock, J. A. y J. O. Skjemstad. 2001. *Soil organic carbon/Soil organic matter*. En: Peverill, K.I., L. A. Sparrow y D. J. Reuter. Soil analysis an interpretation manual. CSIRO Publishing. Australia. 317p.

- Baver, C.D. y W. H. Gardner. 1973. *Física de suelos*. Unión Tipográfica. Editorial Hispanoamericana. 429 pp.
- Birkeland, P.W. 1984. *Soils and Geomorphology*. Oxford University Press. NY. 320 pp.
- Bezdicsek D.C.; R.I. Papendick y R. Lal. 1996. *Introduction: Importance of Soil Quality to Health and Sustainable Land Management*. En: Doran, J.W. y A.J. Jones. *Methods for Assessing Soil Quality*. SSSA Special Publication Number. 89p.
- Bolin, B. y R. Sukumar, 2000. *Global Perspective*. En Watson, R.T. y colaboradores. IPCC Special Report on Land Use, Land-Use Change And Forestry. 122p.
- Bouyoucos, G.J., 1963. *Directions for making mechanical analyses of soil by hydrometer method*. Soil Science. USA. 89p.
- Boschetti, G; C. Quintero; M. Díaz-Zorita y M. Barraco, 2003. *Determinación del fósforo disponible en el suelo por el método de Bray*. Informaciones agronómicas del cono sur No. 17. Argentina. 55p.
- Brady, C. y R. Weil. 1996. *The Nature and Properties of Soils*. Prentice Hall International Editions. USA. 740p.
- Bray, R. H. y L. T. Kurtz. 1945. *Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soil*. Soil Science. USA. 73p.
- Briones, J.A. 2011. *Deterioro ambiental en la vegetación ribereña del río Magdalena D.F. México*. Tesis de Licenciatura en Biología. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. 176p.
- Broquen, P., F. Candan, G. Falbo, J.L. Girardin y A. Apcarian. 2002. *Efecto del Pinus ponderosa Dougl. sobre la reacción del suelo en el Sudoeste de Neuquén, Argentina*. Bosque Vol. 23. Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Chile. pp 47-59.
- Brown, R.B. 2003. *Soil Texture*. Institute of Food and Agricultural Sciences. University of Florida. USA.
- Bruce, R. C. y G. E. Rayment. 1982. *Analytical Methods and Interpretations Used by the Agricultural Chemistry Branch for Soil and Land Use Surveys*. Queensland Department of Primary Industries Bulletin. Australia. 110 p.
- Brus, D. J., J. J. De Gruijter, B. A. Marsman, R. Visschers, A.K. Bregt, A. Breeuwsma y J. Bouma. 1996. The performance of spatial interpolation methods and choropleth maps to estimate properties at points: A soil survey case study. *Envirometrics* Vol. 7. John Wiley and sons. pp. 1-16.
- Burger, J. A. y D. L. Kelting, 1999. *Using soil quality indicators to assess forest stand management*. Forest Ecology and Management. ELSEVIER. 13p.

- Campos A. C., C. Oleshko, J. Etchevers y C. Hidalgo. 2007. *Exploring the effect of changes in land use on soil quality on the Eastern slope of the Cofre de Perote Volcano (México)*. Forest Ecology and Management Vol. 248. ELSEVIER. pp. 174-182.
- Cañada, R.M. 2008. *Análisis Geoestadístico*. En: Moreno, A. Sistemas y Análisis de la Información Geográfica. Alfaomega Grupo Editor. México. 911 p.
- Castillo, R. M. 2003. *Procesos exógenos en la Delegación La Magdalena Contreras, Ciudad de México*. Tesis de Licenciatura en Geografía. Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional Autónoma de México. México. 108 p.
- Cahn, M. D., J. W. Hummel, y B. H. Brouer. 1994. *Spatial analysis of soil fertility for site specific crop management*. Soil Science Society. Am. V 58. pp. 1240-1248.
- Cambardella, C. A., T. B. Moorman., J. M. Novak., T. B. Parkin., D. L. Karlen., R. F. Turco y A. E. Konopka. 1994. *Field scale variability in central Iowa soils*. Soil Science Society. Am. V. 58. pp. 1501-1511.
- Chan, K.Y. 2006. *Bulk Density*. en: Lal, R., ed. Encyclopedia of soil science. CRC Press. Florida. USA. 957p.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). 2006. *Fichas técnicas para la reforestación*. Comisión Nacional Forestal, México. <http://www.conafor.gob.mx>.
- Condrón, L . 2004. *Phosphorus-Surplus and Deficiency*. en: Shjonning, P; S. Elnholt, y Christensen B. T. Managing Soil Quality: Challenges in modern Agriculture. CABI Publishing. UK. 333p.
- Corwin, D.L. y S.M. Lesch. 2005. Characterizing soil spatial variability with apparent soil electrical conductivity I. Survey Protocols. *Computers and electronics in agriculture* Vol. 46. ELSEVIER. pp. 103-133.
- Cram, S; H. Cotler, L.M. Morales, I. Sommer y E. Carmona. 2008. *Identificación de los servicios ambientales potenciales de los suelos en el paisaje urbano del Distrito Federal*. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía. UNAM. Num 66, pp 81-104.
- Council on Soil Testing and Plant Analysts (CSTPA). 1980. *Handbook on reference methods for soil testing*. The council on soil testing and plant analysis. USA. 264 p.
- Dai, W. y Y. Huang. 2006. *Relation of soil organic matter concentration to climate and altitude in zonal soils of China*. Catena V 65. pp. 87-94.
- De las Salas, G. 1987. *Suelos y ecosistemas forestales con énfasis en América tropical*. Instituto Interamericano de cooperación para la Agricultura (IICA). Costa Rica. 447 p.
- Dick, W.A. y E.G. Gregorich. 2004. *Developing and maintaining soil organic levels*. en: Shjonning, P., Elnholt, S. y Christensen B. T. Managing Soil Quality: Challenges in modern Agriculture. CABI Publishing. UK. 333p.

- Doran, J. W. y A.J. Jones. 1996. *Methods for Assessing Soil Quality*. Spec. Publ. # 49, SSSA, Madison, WI. USA. 96p.
- Food and Agriculture Organization (FAO). 1974. *FAO-UNESCO Soil Map of the World, 1:5.000.000*. UNESCO. Paris. 62 p.
- Fassbender, H. W. y E. Bornemisza 1994. *Química de suelos con énfasis en suelos de América latina. Instituto Interamericano de cooperación para la Agricultura (IICA)*. Costa rica. 419 p.
- Fenn, M. E., V.M. Perea-Estrada, L.I. Bauer, M. Pérez-Suárez, D.R. Parker y V. M. Cetina-Alcalá. 2006. Nutrient status and plant growth effects of forest soils in the basin of Mexico. *Environmental Pollution Vol. 140*. ELSEVIER. pp. 187-199.
- Fenton, T.E., J.R. Brown y M.j. Mausbach. 1999. *Effects of long term cropping on organic matter content of soils: Implications for soil quality*. En: Lal, R., ed. *Soil Quality and Soil Erosion*. Ankeny, IA: Soil and Water Conservation Society. USA. 329 p.
- Fernández, L. C., N.G. Rojas; T.G. Roldán; M.E. Ramírez; H.G. Zegarra; R.U. Hernández; R. J. Ávila; D. Flores y J.M. Arce. 2006. *Manual de técnicas de análisis de suelos aplicados a la remediación de sitios contaminados*. SEMARNAT, INE e IMP. México. 180 p.
- Fernández Eguiarte A., F. Uribe Cruz, I. Ramírez del Razo, B. de Jesús Apolinar y A. Vázquez Márquez. 2002. *Evaluación del avance de la mancha urbana sobre el área natural protegida de la Cañada de los Dinamos*. Gaceta Ecológica INE, Semarnat México. pp. 56-67.
- Fisher, F. R; W. L. Pritchett y D. Binkley. 2000. *Ecology and Management of Forest Soils*. Wiley and Sons. USA. 435 p.
- Friedman, S.P. 2005. Soil properties influencing apparent electrical conductivity: *a review*. *Computers and electronics in agriculture* Vol. 46. ELSEVIER. pp. 45-70.
- Galeana, J. M. 2008. *Estimación del contenido y captura potencial de carbono, su valoración económica en la cuenca del río Magdalena, Distrito Federal, México*. Tesis de Licenciatura en Geografía. Facultad de Filosofía y Letras. Universidad Nacional Autónoma de México. 74 p.
- Giraldo, R. 2002. *Introducción a la Geoestadística: Teoría y Aplicación*. Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá. Colombia. 94 p.
- Giraldo, H., W. Troncoso., J. E. Mancera y N. Méndez. 2000. *Geoestadística: una herramienta para la modelación en estuarios*. *Revista Académica de Colombia*. Ciencia V 24. pp. 59-72.
- Godbold, D. L. 2003. *Managing Acidification and Acidity in Forest Soils*. En: *Handbook of Soil Acidity*. Rengel, Z. Ed. CRC Press. USA. 473 p.

- Griffiths, R.P., M. D. Madritch y A. K. Swanson. 2009. *The effects of topography on forest soil characteristics in the Oregon Cascade Mountains (USA): Implications for the effects of climate change on soil properties*. Forest Ecology and Management V 257. ELSEVIER. pp. 1-7.
- Hazelton, P. y B. Murphy. 2007. *Interpreting soil test results, What do all the numbers mean?*. CSIRO Publishing. Australia. 152 p.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 1994. *Guía para la interpretación de cartografía: Edafología*. INEGI, Gobierno del Distrito Federal, México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 1998. *Cuaderno Estadístico Delegacional: Álvaro Obregón, Distrito Federal*. INEGI, Gobierno del Distrito Federal, México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 1998. *Cuaderno Estadístico Delegacional: Cuajimalpa, Distrito Federal*. INEGI, Gobierno del Distrito Federal, México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 1998. *Cuaderno Estadístico Delegacional: La Magdalena Contreras, Distrito Federal*. INEGI, Gobierno del Distrito Federal, México.
- Isaaks, E. y R. M. Srivastava. 1989. *An Introduction to Applied Geostatistics*. Oxford University Press, New York. 561 p.
- International Soil Reference and Information Centre (ISRIC). 1992. *Procedures for soil analysis*. L.P. Van Reeuwijk. Technical paper No.9. International Soil Reference and Information Centre. Wageningen. Alemania. 76 p.
- Jackson, L. M. 1982. *Análisis Químicos de Suelos*. Editorial Omega, Barcelona. España. 317 p.
- Jenny, H. 1980. *The soil resource: Origin and behaviour*. Ecological Studies. Springer-Verlag. USA. 377 p.
- Johnston, C.A. 2001. *Geographic Information Systems in Ecology*. Blackwell Science. EUA. 233 p.
- Journel, A.G. y C. J. Huijbregts. 1978. *Mining Geostatistics*. New York: Academic Press. 600 p.
- Jujnovsky, J. 2006. *Servicios ecosistémicos relacionados con el recurso agua en la cuenca del río Magdalena, Distrito Federal, México*. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. 70 p.
- Karlen, D.L., M.J. Mausbach, J.W. Doran, R.G Cline, R.F. Harris y G.E. Schuman. 1997. *Soil quality: a concept, definition and framework for evaluation*. Soil Science Society of America J. 61: 4-10pp.
- Kemerer, A. y R. Melchiori. 2004. *Variabilidad espacial en suelos agrícolas de la provincial entre ríos*. XIX Congreso argentino de la ciencia del suelo. INTA EEA Paraná.

- Kohlmaier, G. H; M. Weber y R. A. Houghton. 1998. *Carbon dioxide mitigation in forestry and wood industry*. Berlin: Springer. 412 p.
- Knorr, W., I. C. Prentice, J.I. House y E. A. Holland. 2005. *Long-term sensitivity of soil carbon turnover to warming*. Nature Vol. 433. pp. 298-301.
- Kravchenko, A. y D. Bullock. 1999. *A comparative study of interpolation methods for mapping soil properties*. Agronomies. V. 91. Pp. 393-400.
- Krivoruchko, K. y A. Gribov. 2004. *Geostatistical Interpolation and Simulation in the Presence of Barriers*. En: Sanchez- Vila, X; J. Carrera y J.J. Gómez-Hernández. geoENV IV – Geostatistics for Environmental Applications. Kluwer Academic Publishers. Holanda. 537 p.
- Lal, R. 2005. Forest soils and carbon sequestration. Forest Ecology and Management Vol. 220. ELSEVIER. pp. 242-258.
- Lal, R., ed. 1999. *Soil Quality and Soil Erosion*. Ankeny, IA: Soil and Water Conservation Society. EUA. 231 p.
- Larson, W. E. y F. J. Pierce. 1996. *Conservation and enhancement of soil quality*. En Soil Quality Institute Staff (Eds.). The Soil Quality Concept. The Soil Quality Institute, NRCS-USDA. 109p.
- León, H. M. 2007. *Estimación del contenido de C en suelos de bosques templados y su relación con la calidad del suelo*. Tesis de Licenciatura en Biología. FES Zaragoza, Universidad Nacional Autónoma de México. México. 127 p.
- Li, P., Q. Wang, T. Endo, X. Zhao, Y. Kakubari. 2010. *Soil organic carbon stock is closely related to aboveground vegetation properties in cool-temperate mountainous forests*. Geoderma Vol. 407. ELSEVIER. pp. 407-415.
- Monges, Y.L. 2009. Calidad del agua como elemento integrador para la rehabilitación del Río Magdalena, Distrito Federal. Tesis de Maestría en Ciencias Biológicas. Instituto de Ecología. Universidad Nacional Autónoma de México. 69 p.
- Montero, J. M. y B. Larraz. 2008. *Introducción a la geoestadística lineal*. Serie Metodología y Análisis de Datos en Ciencias Sociales. Netbiblio. España. 142 p.
- Moreno, A. 2008. *Abundancia y diversidad de hongos micorrizógenos arbusculares en la CRM*. Tesis de Licenciatura en Biología. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. 48p.
- Moreno D, R. 1978. *Clasificación de pH del suelo, contenido de sales y nutrientes asimilables*. INIA-SARH. México.
- Munsell. 2000. *Munsell Soil Color Charts*. Munsell Color GretagMacbeth. EUA. 10 pp.

- Nava, M. 2002. *Los bosques de la Cuenca alta del Río Magdalena, un estudio de vegetación y fitodiversidad*. Tesis de Licenciatura en Biología. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. México. 65 p.
- Noble, I. et al. 2001. *Implications of Different Definitions and Generic Issues*. En Watson, R.T. y colaboradores (eds.) IPCC Special Report on Land Use, Land-Use Change And Forestry. EUA. 53-126 pp.
- Núñez, J. 2000. *Fundamentos de edafología*. Editorial EUNED. Costa Rica. 188 p.
- Olea, R.A. 1999. *Geostatics for Engineers and Earth Scientists*. Kluwer Academic Publishers. EUA. 226 p.
- Oliva, M. y F. García-Oliva. 1998. *Un nuevo campo de acción en la química biológica: Parte I*. Generalidades sobre el cambio global. Educación Química. 142p.
- Olivier, M.A. 2010. *The Variogram and Kriging*. En: Fisher, M. y A. Getis. Handbook of Applied Spatial Analysis, Software Tools, Methods and Applications. Springer-Verlag. Alemania. 805 p.
- Ordóñez, J. A. B. 2002. *Emisiones y captura de carbono derivadas de la dinámica de cambio en el uso del suelo en los bosques de la Región Purépecha, Michoacán, México*. Documento que para obtener la Candidatura a doctor en Ciencias Biomédicas presenta; Programa Doctoral en Ciencias Biomédicas, Instituto de Ecología, UNAM. México.
- Ordoñez, J. A. B. y O. Maser. 2001. *Captura de carbono ante el cambio climático*. Madera y Bosques 7(1). INIFAP. México. 66p.
- Palacio, J. L., C. Siebe, y A. Cortés. 1994. *Variabilidad y distribución espaciales de algunos parámetros físicos y químicos del suelo en el distrito de riego 03, estado de Hidalgo, México; Parte 1, semivariogramas*. Revista Mexicana de ciencias geológicas V 11. Instituto de Geología, UNAM. pp. 62-67.
- Parra, M.A., R. Fernández-Escobar, C. Navarro y O. Arquero. 2003. *Los suelos y la fertilización del olivar cultivado en zonas calcáreas*. MUNDI-PRENSA. España. 256 p.
- Peña-Ramírez, V. M., L. Vázquez-Selem y C. Siebe. 2009. Soil organic carbon stocks and forest productivity in volcanic ash soils of different age (1835-30,500 years B.P.) in Mexico. *Geoderma* Vol. 224. pp. 224-234.
- Pinzón, P.A. 1993. *Propiedades físicas de los suelos derivados de cenizas volcánicas de Colombia*. Suelos Ecuatoriales. Colombia. pp. 20-30.
- Pitty, A.F. 1979. *Geography and soil properties*. Routhledge. USA. 368 p.

- Porta, J., M. López-Acevedo y R. M: Poch. 2008. *Introducción a la edafología: Uso y protección del suelo*. Ediciones Mundi-Prensa. España. 448 p.
- Porta, J., M. López-Acevedo, y C. Roquero, 2003. *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Mundi-Prensa. España. 959 p.
- Prado, B., C. Duwig., C. Hidalgo., D. Gómez., H. Yee., C. Prat., M. Esteves y J.D. Etchevers. 2007. Characterization, functioning and classification of two volcanic soil profiles under different land uses in Central Mexico. *Geoderma Vol. 139*. ELSEVIER. pp. 300-313.
- Rahman, M.H., Okubo, A., Sugiyama, S., Mayland, H.F.2008. *Physical, chemical and microbiological properties of an Andisol as related to land use and tillage practice*. *Soil and Tillage Research Vol.101*. ELSEVIER. pp. 10-19.
- Ramírez-Salazar, M. 1998. *Influencia de la Actividad humana sobre las propiedades edáficas del horizonte A, en los paisajes de una cuenca del parque nacional Cofre de Perote, Veracruz*. Tesis de Licenciatura en Geografía. Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional Autónoma de México. México. 124 p.
- Ramos Ramos-Elorduy, A. 2008. *Propuesta de reclasificación y zonificación participativa de la zona protectora forestal Cañada de Contreras, Distrito Federal, México*. Tesis de Maestría en Ciencias Biológicas. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. 99p.
- Rasmussen, C., R. J. Southard y W. R. Horwarth. 2006. *Mineral control of organic carbon mineralization in a range of temperate conifer forest soils*. *Global Change Biology Vol. 12*. pp. 834-847.
- Rengasamy, P. y G. J. Churchman, 1999. *Cation Exchange Capacity , Exchangeable Cations and Sodicity*. En: Peverill, K., Sparrow L. y Reuter, D. *Soil analysis: an Interpretation Manual*. CSIRO Publishing. Australia. 317 p.
- Ríos, R. C. 2006. *Evaluación de los indicadores de degradación del suelo en el ejido San Fernando, Veracruz, México*. Tesis de Licenciatura en Biología. Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de México. México. 131 p.
- Rucks, L., F. Garcia, A. Kaplán, J. Ponce de León y M. Hill. 2004. *Propiedades Físicas del Suelo*. Facultad de Agronomía, Universidad de la República. Uruguay. 68 p.
- Rzedowski, J. 1988. *Vegetación de México*. Limusa. México. 432 p.
- Santibáñez, G. 2009. *Composición y estructura del bosque de Abies religiosa en función de la heterogeneidad ambiental y determinación de su grado de conservación en la cuenca del Río Magdalena, México, D.F.* Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. 134 p.
- Santra, P., U.K. Chopra y D. Chakraborty. 2008. *Spatial variability of soil properties and its application in predicting surface map of hydraulic parameters in an agricultural farm*. *Current Science Vol. 95*. pp. 937-945.

- Seibert, J., J. Stendahl y R. Sorensen. 2007. *Topographical influences on soil properties in boreal forests*. Geoderma Vol. 141. ELSEVIER. pp. 139-148.
- Seybold C.A., Mausbach M.J., Karlen D.J. and Rogers H.H. 1998. *Quantification of soil quality*. En: Lal R., Kimble J.M., Follet R.F. and Stewart B.A. (eds.). *Advances in Soil Science*. CRC Press. Boca Raton. Florida . 404p.
- Skopp, J. M. 1999. *Physical properties of primary particles*. En: Sumner, M. E. *Handbook of soil science*. CRC Press. NY. USA. 2148 p.
- Schoenholtz, S.H., H. Van Miegroet y J. A. Burger. 2000. *A Review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities*. *Forest Ecology and Management*. Elsevier. 356p.
- Shoji, S., R. Dahlgren y M. Nanzyo. 1993. *Genesis of Volcanic Ash soils*. *Developments in soil science* 21. Elsevier Science Publishers B.V. Amsterdam, Holanda. 287 p.
- Schumacher, B.A. 2002. *Methods for Determination of Total Organic Carbon (TOC) in Soils and Sediments*. Ecological Risk Assessment Support Center. Environmental Protection center. EUA. 25p.
- Snakin, V. V., A. Prisyazhnaya y E. Kovács-Láng. 2001. *Soil Liquid Phase Composition*. Elsevier. Holanda. 311 p.
- Soil and Plant Analysis Council. 1992. *Soil analysis, handbook of reference methods*. CRC Press. EUA. 184 p.
- Sommer, C., Fernández, P., Rivas, H. y Gutiérrez, M. 2000. *La geoestadística como herramienta en estudios de contaminación de suelos. Análisis de caso: afectación por arsénico, plomo y cadmio contenidos en jales mineros*. *Contaminación ambiental*. 205-214 pp.
- Spaargaren, O. y F. Nachtergaele. 1998. *Topsoil characterization for sustainable land management*. Land and Water Development Division, Italia. 74 p.
- Stevenson, F.J. 1994. *Humus Chemistry: Genesis, Composition, and Reactions*. Wiley-Blackwell. EUA. 512 p.
- Tate, R.L. 1992. *Soil Organic Matter: Biological and Ecological Effects*. Krieger Publishing Company. EUA. 304 p.
- Tatsuhara, S. y H. Kurashige. 2001. *Estimating foliage biomass in a natural deciduous broad-leaved forest area in a mountainous district*. *Forest Ecology and Management* V 152. ELSEVIER. pp. 141-148.
- Thompson, L. M. y F. R. Troeh. 1988. *Los suelos y su fertilidad*. Editorial Reverté. España. 629 p.
- Tsui C., Z. Chen, C. Hsieh. 2004. *Relationships between soil properties and slope position in a lowland rain forest of southern Taiwan*. *Geoderma* Vol. 123. ELSEVIER. pp. 131-142.

- United States Department of Agriculture (USDA). 1999. *Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo*. Instituto de calidad de suelos. Departamento de Agricultura. USDA. EUA. 88p.
- Valera, P. M. A. 1993. *Fisicoquímica y mineralogía de Andosoles de la Región de Teziutlan, Estado de Puebla*. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 295 p.
- Van Ranst, E., S.R. Uzami., J. Vanderveelen y J. Shamshuddin. 2004. *Surface activity of Andisols on volcanic ash along the Sunda arc crossing Java island, Indonesia*. Geoderma Vol. 123. pp. 193-203.
- Villatoro, M., C. Henríquez, y F. Sancho. 2008. *Comparación de los interpoladores IDW y Kriging en la variación especial del pH, CA, CICE y P del suelo*. Agronomía Costarricense V 32. pp. 95-105.
- Wagai, R., L. M. Mayer., K. Kitayama, y H. Knicker. 2008. *Climate and parent material control on organic matter storage in surface soils: A three-pool, density-separation approach*. Geoderma, V 147. ELSEVIER. pp. 23-33.
- Wakertin, B.P. 1992. *Management of andisols related to their structure*. Suelos Ecuatoriales. Colombia. pp. 9-15
- Warrick, A.W. y D. E. Myers. 1987. *Optimization of Sampling Locations for Variogram Calculations*. Water Resources Research Vol. 23. pp 496 -500.
- Webster, R. 2008. *Soil science and geostatistics*. En: Soil geography and geostatics: concepts and applications, Krasilnikov, P., Carré P. y Montanarella, L. (eds.). Office for official publications of the European communities. Luxemburgo. 203 p.
- Webster, R. y M.A. Olivier. 2007. *Geostatistics for Enviromental Scientists*. John Wiley and Sons. Inglaterra. 295 p.
- Wei, W., F. Yan, Z. Wang y H. Liu. 2008. *Assessing effects of digital elevation model resolutions on soil-landscape correlations in a hilly area*. Agriculture Ecosystems & Environment Vol. 126. ELSEVIER. pp.209-216.
- Venegas, J., L. Jean, A. Trinidad y F. Gavi. (1999). *Correlación y calibración de soluciones extractantes del fósforo aprovechable en Andisoles de la Sierra Tarasca*. Terra Vol. 1. pp. 287-291.
- Yimer, F., S. Ledin y A. Abdelkadir. 2006. Soil property variations in relation to topographic aspect and vegetation community in the south-eastern highlands of Ethiopia. Forest Ecology and Management Vol. 232. ELSEVIER. pp. 90-99.

Zehetner, F. y W.P. Miller. 2006. *Soil variations along a climatic gradient in an Andean agro-ecosystem*. Geoderma Vol. 137. ELSEVIER. pp. 126-134.

Zornoza, R., J. Mataix-Solera, C. Guerrero, V. Arcenegui, A.M. Mayoral, J. Morales y J. Mataix-Beneyto. 2007. *Soil properties under natural forest in the Alicante Province of Spain*. Geoderma Vol. 142. ELSEVIER. pp. 334-341.

ANEXOS

ANEXO 1

Semivariogramas experimentales y ajustes de modelos teóricos para las variables medidas.

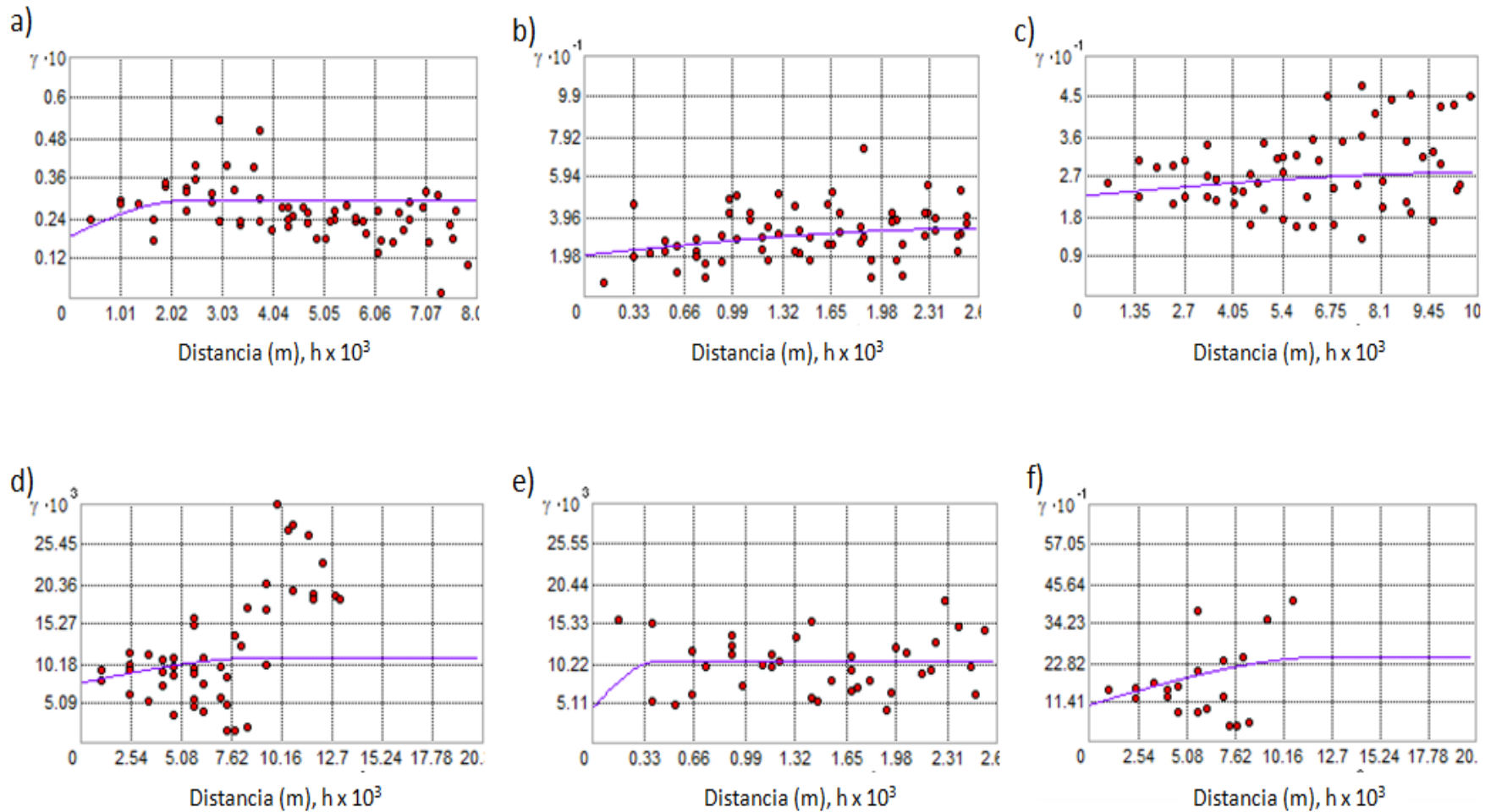
ANEXO 2

Cuadros de los parámetros estadísticos de la interpolación de los mapas.

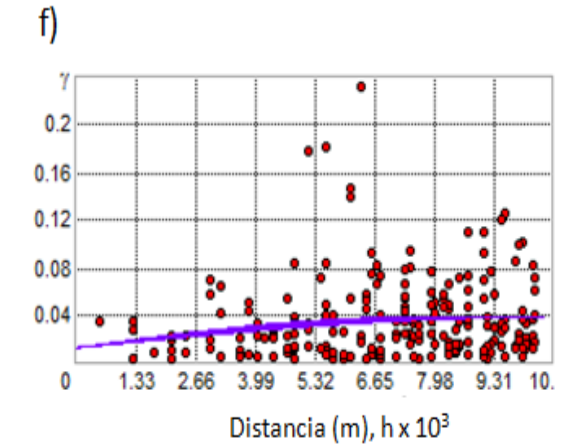
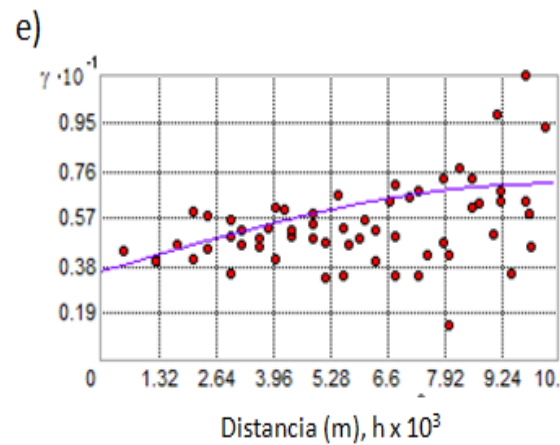
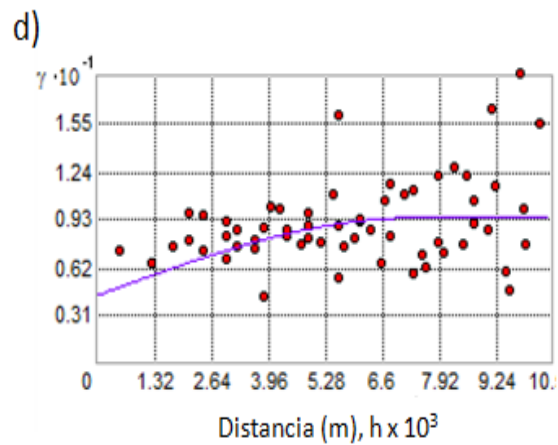
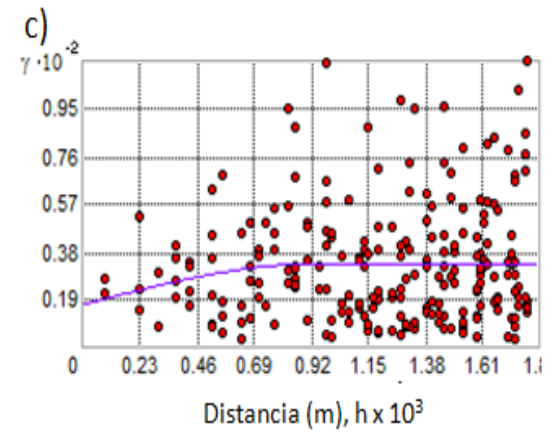
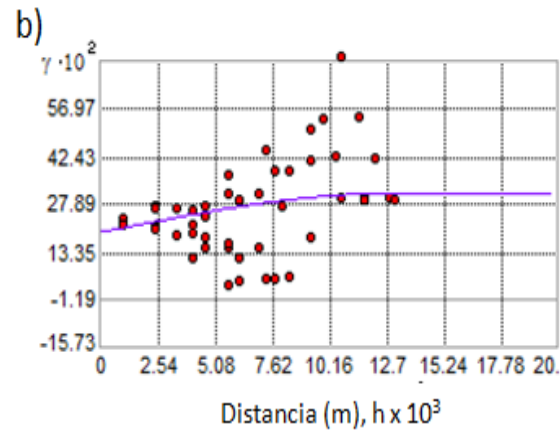
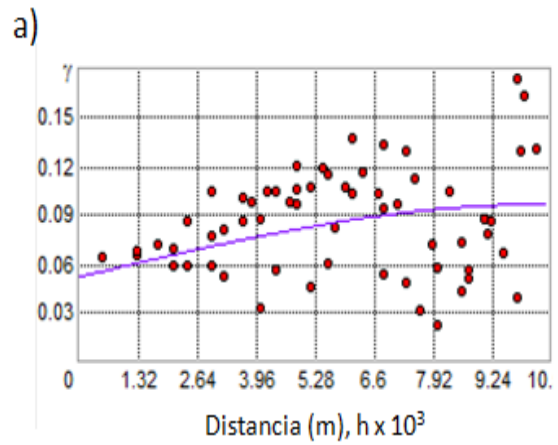
ANEXO 3

Mapas del error estándar de la predicción calculado a partir de las interpolaciones para las variables medidas

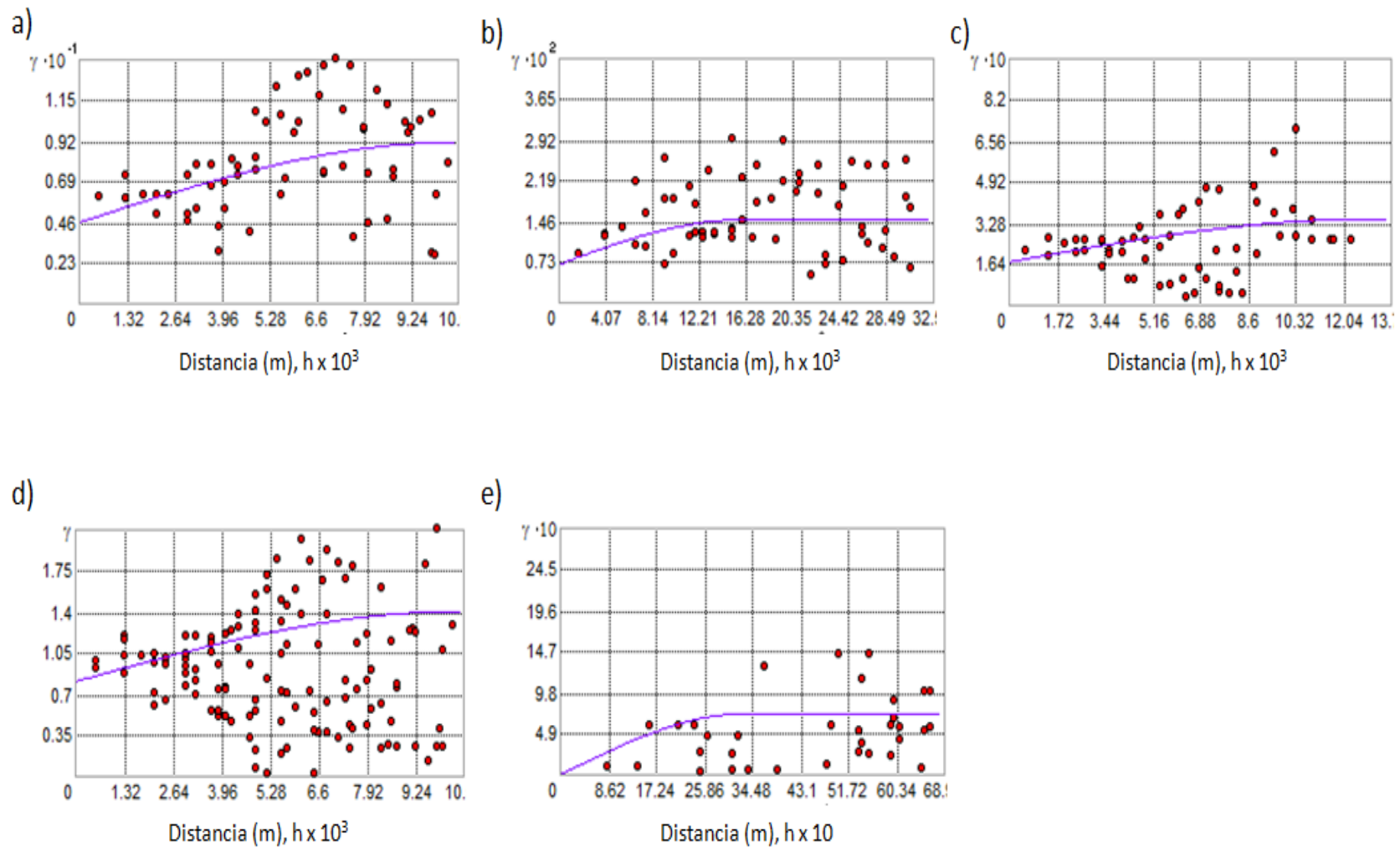
ANEXO 1



I.A. Semivariogramas experimentales y ajustes de modelos teóricos para las variables medidas. a) % arenas; b) % limos; c) % arcillas; d) densidad real; e) densidad aparente; f) % humedad.



I.B. Semivariogramas experimentales y ajustes de modelos teóricos para las variables medidas. a) pH; b) conductividad eléctrica; c) Fósforo; d) Materia orgánica; e) Carbono orgánica total; f) Nitrógeno total.



I.C. Semivariogramas experimentales y ajustes de modelos teóricos para las variables medidas. a) Capacidad de intercambio catiónico; b) Sodio; c) Potasio; d) Calcio; e) Magnesio.

ANEXO 2

a)

Distribución	Arenas	Limos	Arcillas
Transformación	Box-Cox (0.05)	No	No
Media	4.594	17.395	19.478
Mediana	4.580	17.447	20.053
Curtosis	2.735	2.727	2.937
Asimetría	0.578	0.279	-0.477
Semivariograma			
Modelo	esférico	circular	esférico
Anisotropía	No	No	No
Búsqueda de Vecindad			
Número de vecinos	5	5	3
Número de sectores	8	4	8
Validación Cruzada			
Error estándar de la predicción	8.248	5.428	4.988
Error cuadrático medio estandarizado	0.993	0.952	0.963

b)

Distribución	D.R.	D.A.
Transformación	Log	Box-Cox (0.4)
Media	0.478	-0.287
Mediana	0.474	-0.282
Curtosis	3.042	0.002
Asimetría	0.282	3.134
Semivariograma		
Modelo	esférico	circular
Anisotropía	No	No
Búsqueda de Vecindad		
Número de vecinos	3	3
Número de sectores	4	8
Validación Cruzada		
Error estándar de la predicción	0.154	0.086
Error cuadrático medio estandarizado	0.974	0.995

c)

Distribución	
Transformación	Box-Cox (0.92)
Media	40.075
Mediana	40.897
Curtosis	2.296
Asimetría	0.001
Semivariograma	
Modelo	esférico
Anisotropía	Sí
Búsqueda de Vecindad	
Número de vecinos	9
Número de sectores	4
Validación Cruzada	
Error estándar de la predicción	15.860
Error cuadrático medio estandarizado	1.050

d)

Distribución	
Transformación	No
Media	6.023
Mediana	6.026
Curtosis	3.449
Asimetría	0.074
Semivariograma	
Modelo	esférico
Anisotropía	Sí
Búsqueda de Vecindad	
Número de vecinos	3
Número de sectores	4
Validación Cruzada	
Error estándar de la predicción	0.255
Error cuadrático medio estandarizado	0.9803

II.A. Cuadros de los parámetros estadísticos de la interpolación de los mapas de: a) Textura; b) Densidad real y aparente; c) % humedad y d) pH.

a)

Distribución	
Transformación	Box-Cox (.18)
Media	0.939
Mediana	0.977
Curtosis	2.537
Asimetría	0.091
Semivariograma	
Modelo	esférico
Anisotropía	Sí
Búsqueda de Vecindad	
Número de vecinos	5
Número de sectores	8
Validación Cruzada	
Error estándar de la predicción	1.006
Error cuadrático medio estandarizado	0.965

b)

Distribución	
Transformación	Box-Cox (0.8)
Media	6.635
Mediana	5.892
Curtosis	3.013
Asimetría	0.955
Semivariograma	
Modelo	circular
Anisotropía	No
Búsqueda de Vecindad	
Número de vecinos	3
Número de sectores	1
Validación Cruzada	
Error estándar de la predicción	9.380
Error cuadrático medio estandarizado	1.042

c)

Distribución	
Transformación	Box-Cox (0.88)
Media	8.955
Mediana	9.353
Curtosis	2.080
Asimetría	0.001
Semivariograma	
Modelo	circular
Anisotropía	No
Búsqueda de Vecindad	
Número de vecinos	4
Número de sectores	8
Validación Cruzada	
Error estándar de la predicción	3.623
Error cuadrático medio estandarizado	0.965

d)

Distribución	
Transformación	No
Media	6.978
Mediana	7.250
Curtosis	2.079
Asimetría	0.063
Semivariograma	
Modelo	Esférico
Anisotropía	No
Búsqueda de Vecindad	
Número de vecinos	5
Número de sectores	8
Validación Cruzada	
Error estándar de la predicción	2.100
Error cuadrático medio estandarizado	0.961

II.B. Cuadros de los parámetros estadísticos de la interpolación de los mapas de: a) C.E; b) Fósforo; c) MOS y d) COT.

a)

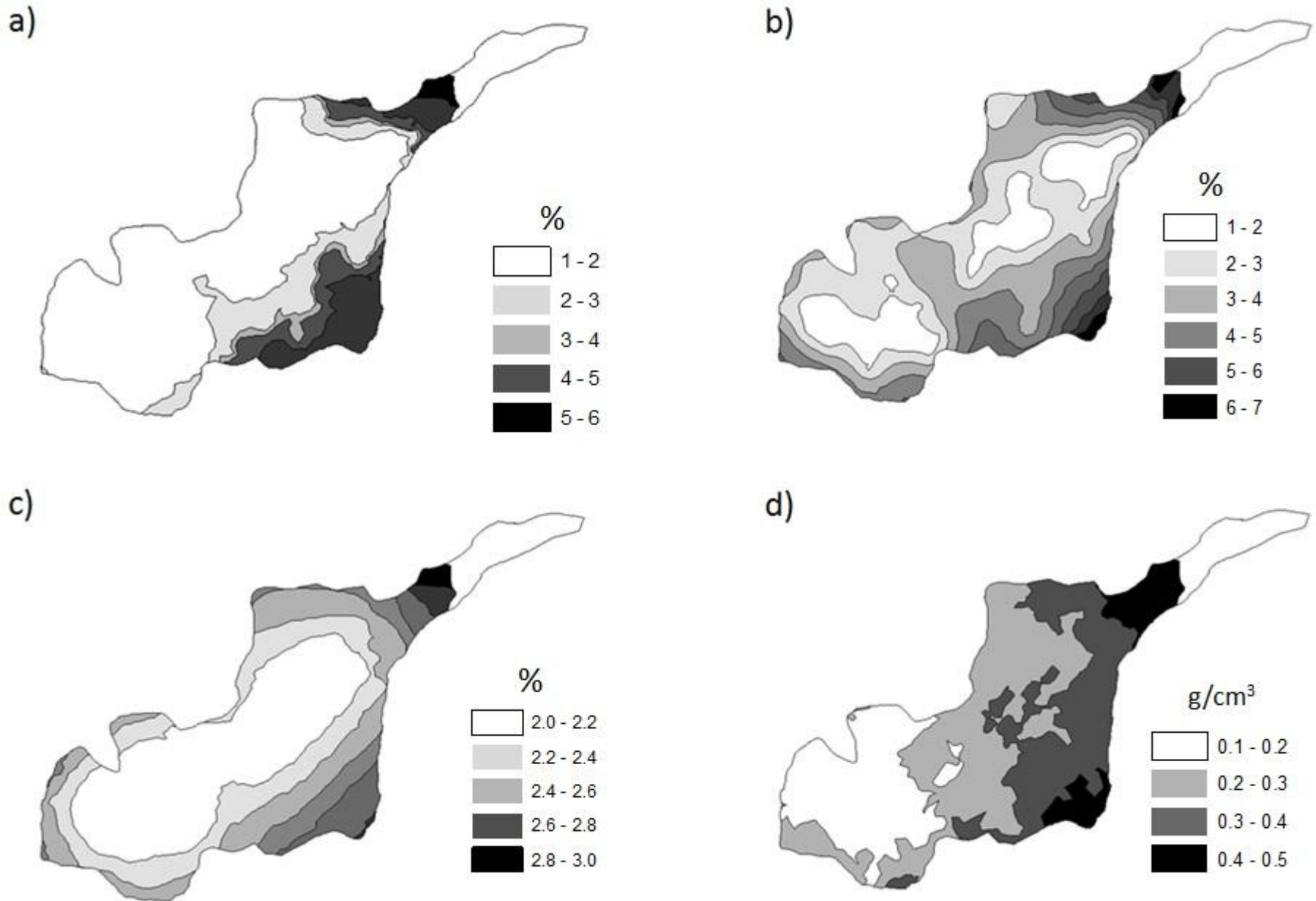
Distribución	
Transformación	Box-Cox (0.65)
Media	-0.590
Mediana	-0.573
Curtosis	2.514
Asimetría	0.002
Semivariograma	
Modelo	Esférico
Anisotropía	Sí
Búsqueda de Vecindad	
Número de vecinos	3
Número de sectores	8
Validación Cruzada	
Error estándar de la predicción	0.149
Error cuadrático medio estandarizado	0.901

b)

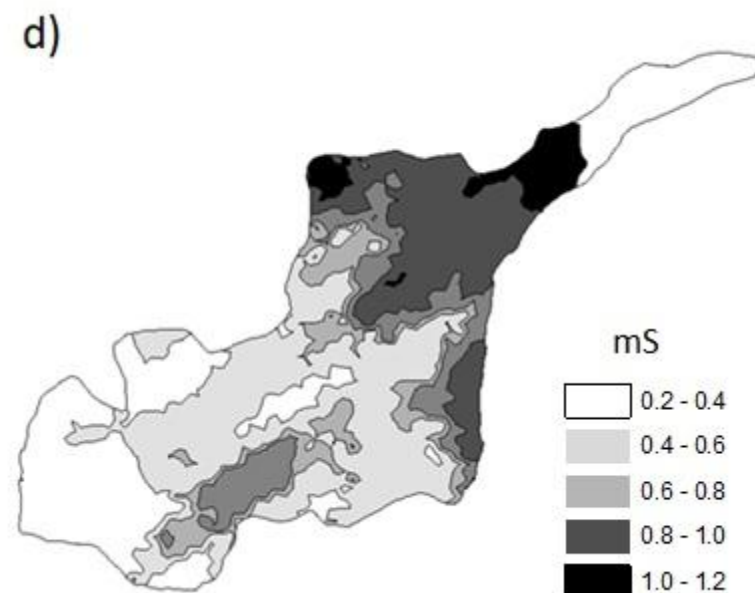
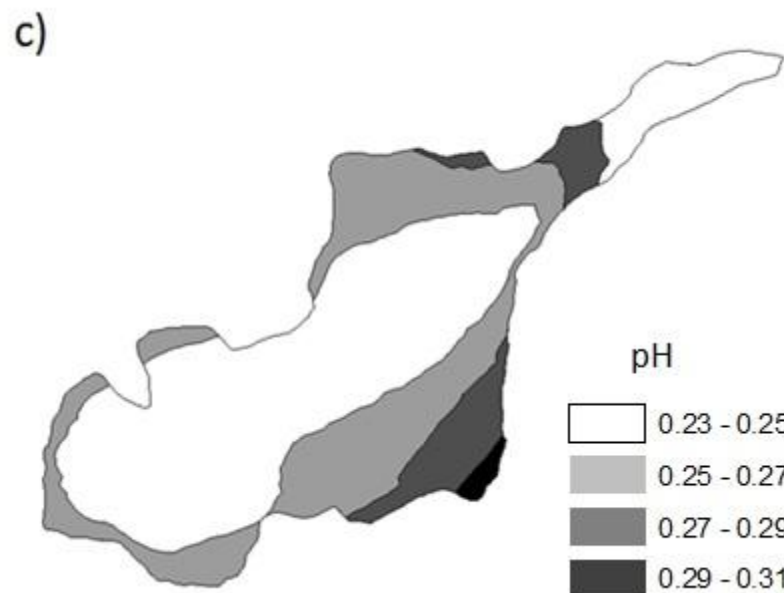
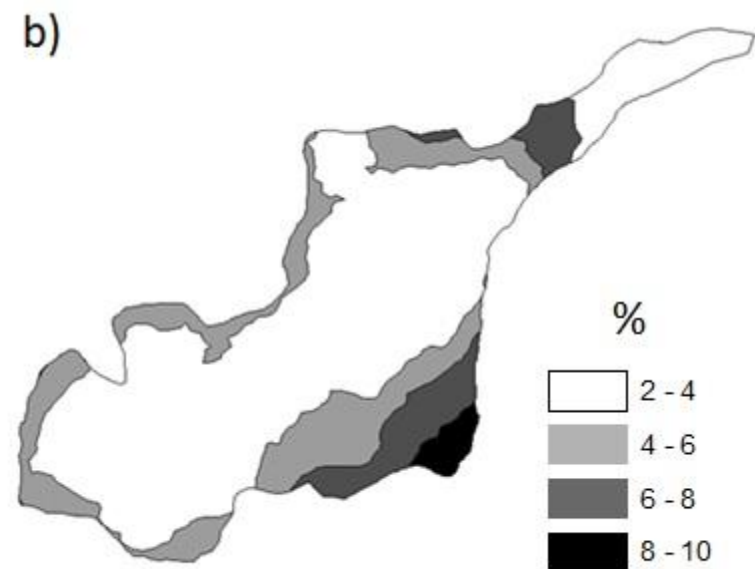
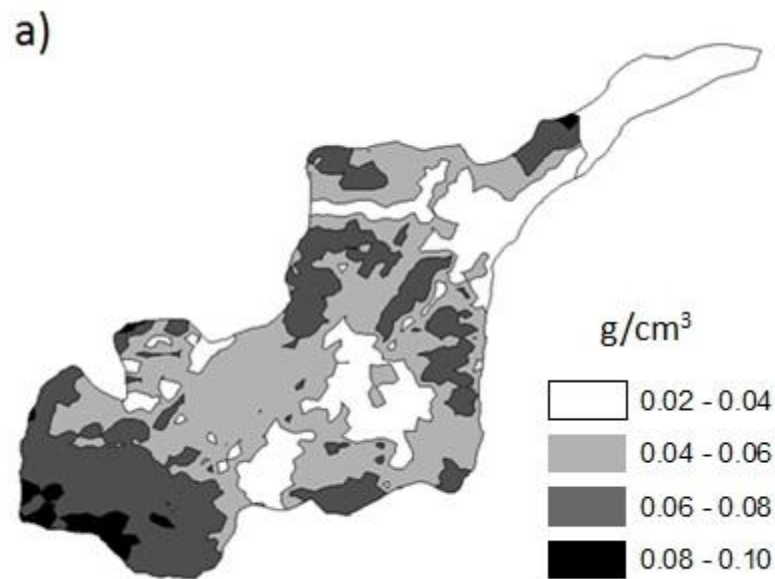
Distribución	CIC	Na	K	Ca	Mg
Transformación	No	Box-Cox(0.5)	Box-Cox (0.49)	Box-Cox(0.34)	Box-Cox(0.5)
Media	4.246	1.461	-0.876	1.267	-1.105
Mediana	4.191	1.624	-0.994	1.465	-0.989
Curtosis	3.763	2.400	2.497	2.210	3.004
Asimetría	0.851	0.218	0.449	0.004	-0.100
Semivariograma					
Modelo	esférico	Esférico	Esférico	esférico	Esférico
Anisotropía	Sí	No	No	No	No
Búsqueda de Vecindad					
Número de vecinos	3	5	3	5	3
Número de sectores	4	8	8	8	8
Validación Cruzada					
Error estándar de la predicción	2.383	0.030	0.263	2.003	0.285
Error cuadrático medio estandarizado	1.003	0.926	1.083	1.002	1.014

II.C. Cuadros de los parámetros estadísticos de la interpolación de los mapas de: a) Nitrógeno total y Capacidad de intercambio catiónico.

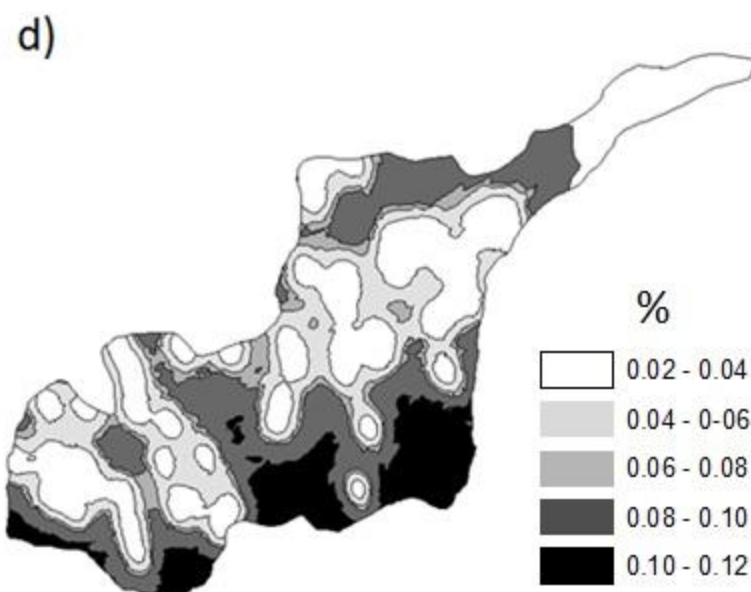
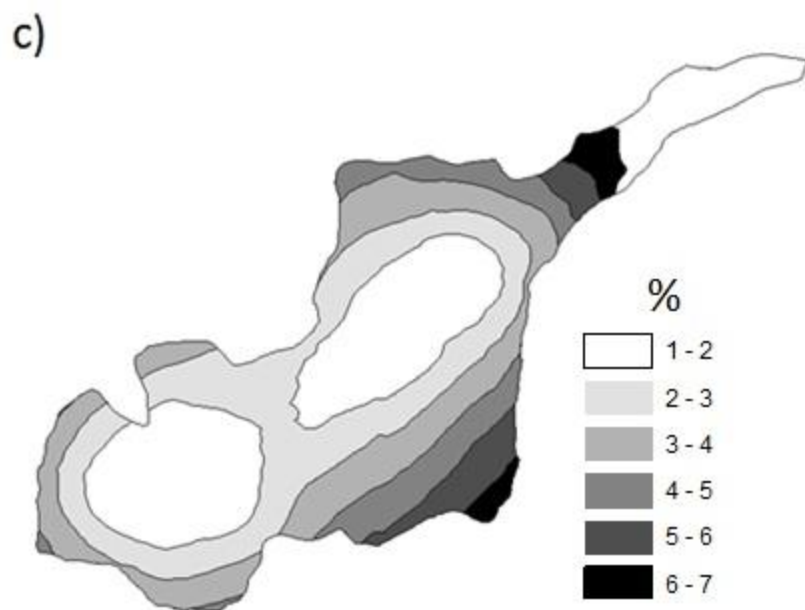
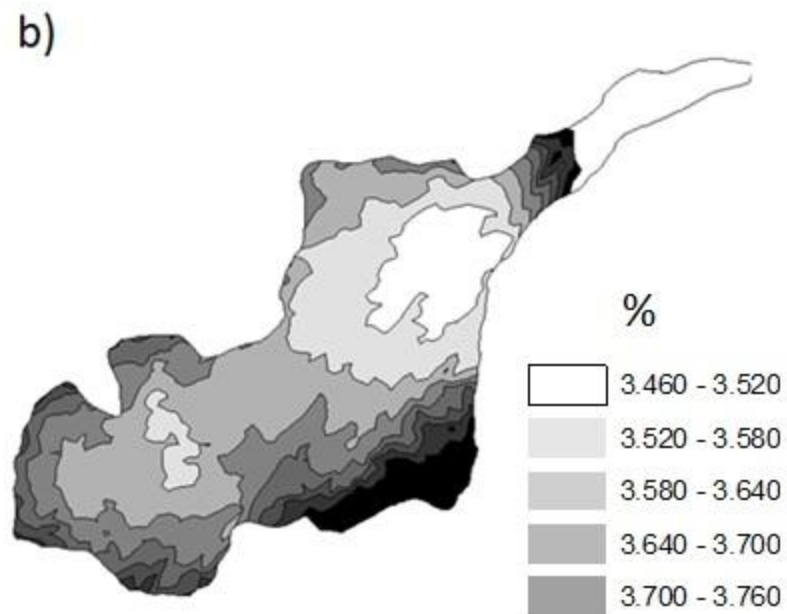
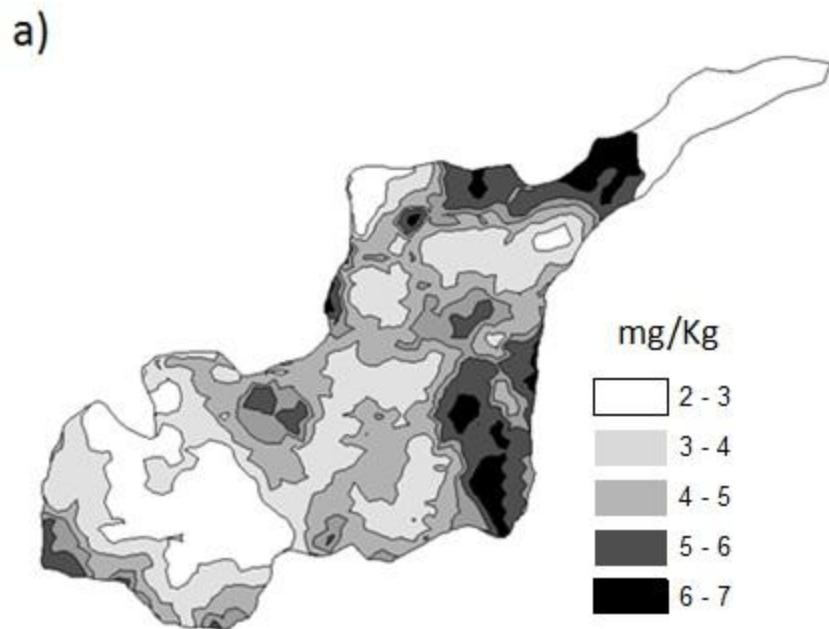
ANEXO 3



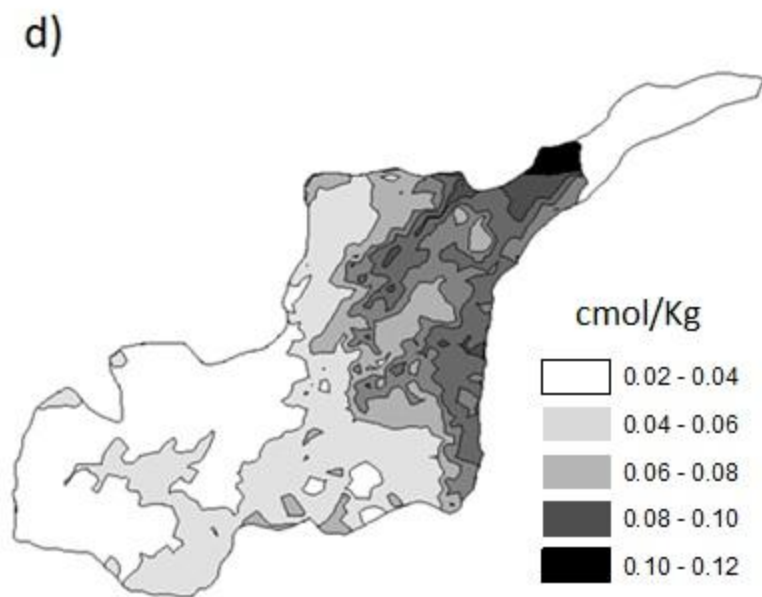
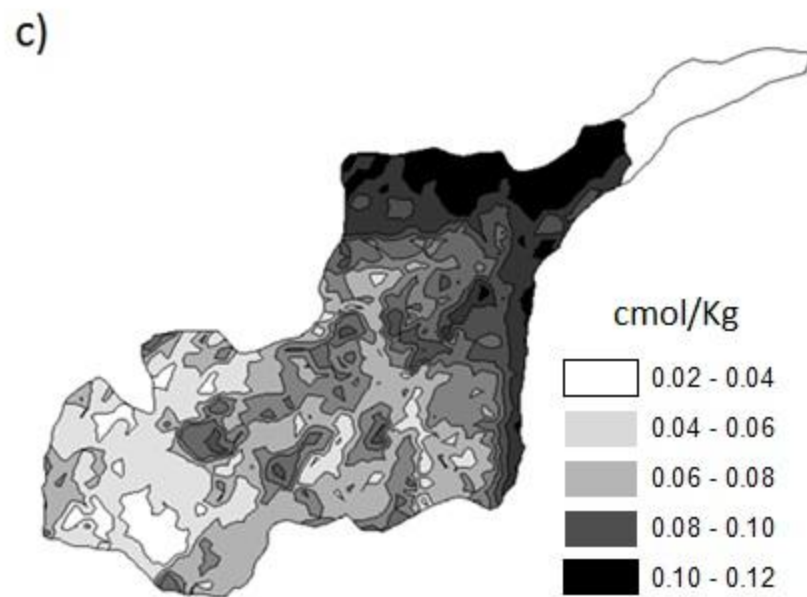
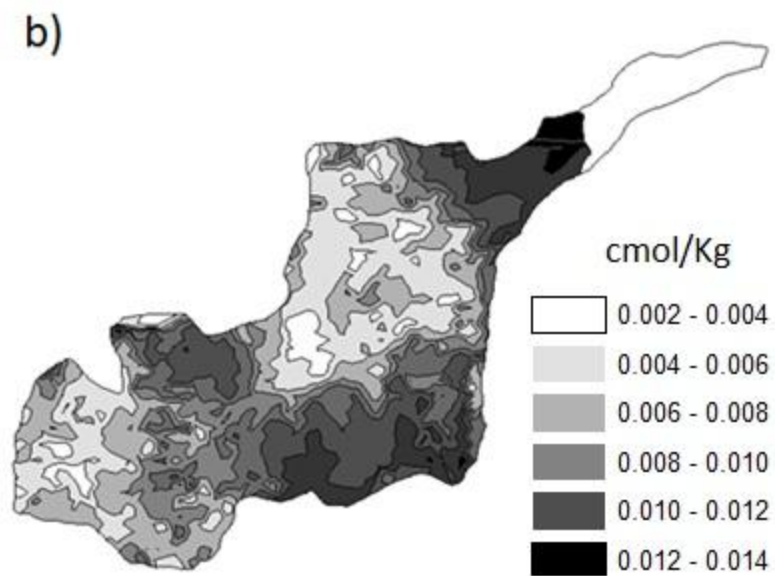
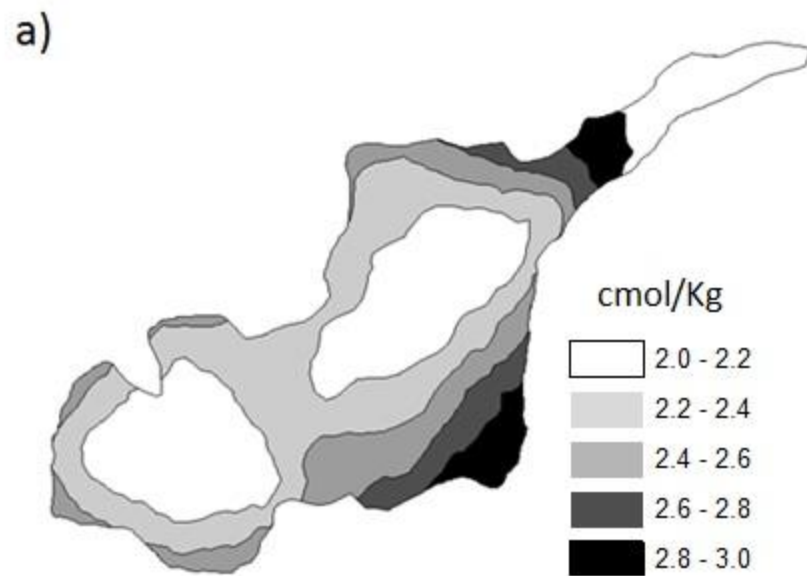
III.A. Error estándar de la predicción calculado a partir de las interpolaciones para las variables medidas. a) % arenas; b) % limos; c) % arcillas; d) densidad real. Colores claros indican un menor error.



III.B. Error estándar de la predicción calculado a partir de las interpolaciones para las variables medidas. a) Densidad aparente; b) % humedad; c) pH; d) conductividad eléctrica. Colores claros indican un menor error.

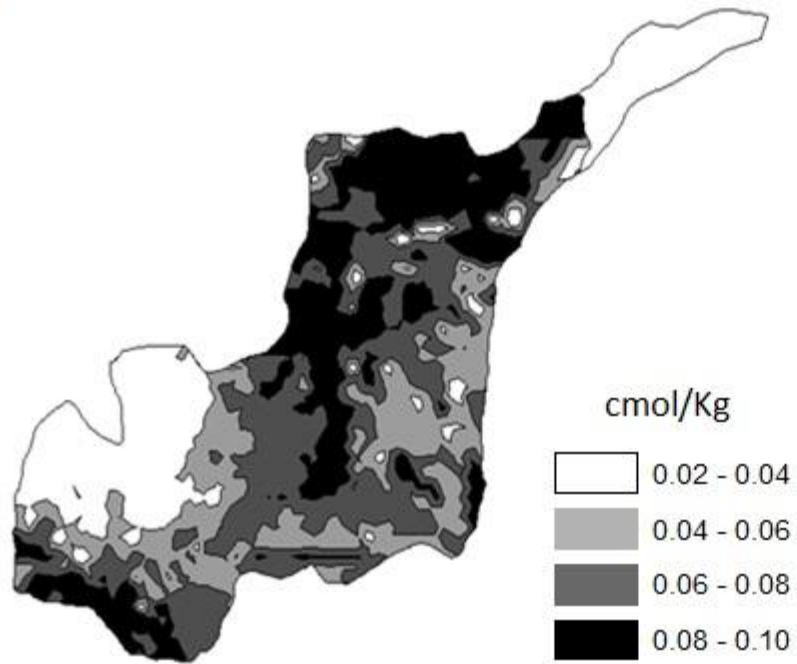


III.C. Error estándar de la predicción calculado a partir de las interpolaciones para las variables medidas. a) Fósforo; b) Materia orgánica; c) Carbono orgánico total; d) Nitrógeno total. Colores claros indican un menor error.



III.D. Error estándar de la predicción calculado a partir de las interpolaciones para las variables medidas. a) Capacidad de intercambio catiónico; b) Sodio; c) Potasio; d) Calcio. Colores claros indican un menor error.

a)



III.C. Error estándar de la predicción calculado a partir de las interpolaciones para las variables medidas. a) Magnesio. Colores claros indican un menor error.

