

Notas de conferencia: Bases De Datos Geográficos de Suelos y el Uso de Programas para su Construcción

D G Rossiter

International Institute for Aerospace Survey & Earth Sciences (ITC)
Enschede-The Netherlands
Febrero 1999

Versión traducida, adaptada y actualizada al español por

Ronald Vargas Rojas

Universidad Mayor de San Simón – Centro CLAS
FAO-Proyecto SWALIM
Junio 2006
Nairobi, Kenya

Audiencia

Este texto esta diseñado para aquellas personas que desean construir una Base de Datos Geográfica de Suelos que sea útil (SGDB por sus siglas en ingles). También puede ser utilizada por aquellas personas que utilizan bases de datos existentes y que sean similares.

Temas

En primer lugar, defino lo que es una SGDB y explico en que contextos puede ser útil. A esto le sigue una discusión abstracta de los conceptos básicos de la cobertura suelo y como nos imaginamos la distribución espacial del suelo. Uno de los modelos conceptuales mas importantes, aquel del cuerpo de suelo como "entidad topológica", se encuentra desarrollado a detalle, tanto a nivel conceptual como lógico (datos). Aquí el mayor énfasis es en la correcta estructuración de la base de datos de los atributos. Otro modelo conceptual importante, aquel como campo continuo, se discute brevemente. Luego, se discuten aspectos prácticos de la construcción de la SGDB, especialmente lo relacionado a los problemas geométricos causados por las diversas fuentes de datos. Una vez que una SGDB ha sido construida, esta puede ser consultada; se discuten métodos para realizar dichas consultas. Una preocupación practica relacionada es la cartografía de suelos, es decir, como los mapas que se encuentran almacenados en la SGDB serán presentados al cliente. Posteriormente, discuto la gran importancia de los que es Metadata, es decir, los datos que describen la base de datos. Finalmente, ponemos en consideración algunos ejemplos de Base de Datos Geográfica de Suelos existentes, es decir como Software independiente.

Enlaces en Internet y referencias

Diversos enlaces de internet relacionados a bases de datos geográfica de suelos, pueden encontrarse en el topico "Digital Soil Survey" de mi "Compendium of On-Line Soil Survey Information" (Compendio en Línea de Información sobre Levantamiento de Suelos), en:

http://www.itc.nl/personal/rossiter/research/rsrch_ss.html

La literatura sobre SGDB como tal no es extensa. Burrough [5] escribió un articulo en una enciclopedia SIG. Un articulo muy recomendable dentro la misma enciclopedia es aquel escrito por Taylor [41] sobre SIG en países de desarrollo. Algunos trabajos antiguos pero importantes incluyen [47]. Durante la ultima parte de la década de 1960 y el inicio de los 70's, se llevaron a cabo Talleres Internacionales, pero muchos de estos trabajos son actualmente obsoletos debido al cambio en los conceptos tanto en la geografía del suelo como en la teoría de bases de datos. Muchas SGDB exitosas y operacionales han sido desarrolladas por agencias nacionales de levantamiento de suelos (Canadá, Holanda, USA, UK), así

como grupos internacionales (EC Mapa de Suelos de Europa, SOTER, Mapa mundial de suelos FAO); estos son buenos ejemplos para estudiar pero se debe tomaren cuenta sus objetivos.

Para las técnicas de modelamiento relacionadas al modelo continuo de variabilidad espacial, una buena introducción en el contexto de Geología se puede encontrar en [11]; un documento mas detallado es [22]; un libro con ejemplos específicos a la ciencia del suelo es [45].

INDICE

<u>1</u>	<u>ESQUEMA CONCEPTUAL</u>	1
1.1	<u>Preguntas que puede responder una SGDB</u>	2
1.2	<u>¿Qué se representa en una SGDB?</u>	4
1.2.1	<u>¿A que nos referimos por suelo?</u>	4
1.2.2	<u>¿Qué se representa?</u>	5
1.2.3	<u>¿Qué tiene de especial una SGDB?</u>	6
1.3	<u>Representando el espacio en una SGDB</u>	6
1.3.1	<u>Variabilidad espacial del suelo</u>	7
1.3.2	<u>Modelos conceptuales del espacio</u>	8
1.3.3	<u>Modelos lógicos espaciales</u>	10
1.3.4	<u>Modelos físicos</u>	11
<u>2</u>	<u>ESTRUCTURA DE UNA SGDB TIPO ENTIDAD</u>	12
2.1	<u>Polígonos</u>	13
2.1.1	<u>Polígonos minimamente legibles</u>	13
2.2	<u>Unidades de mapeo</u>	15
2.3	<u>Líneas</u>	16
2.3.1	<u>Líneas que representan limites</u>	16
2.3.2	<u>Elementos lineales</u>	17
2.4	<u>Puntos</u>	17
2.4.1	<u>Puntos de observación</u>	17
2.4.2	<u>Cuerpos de suelo pequeños (símbolos)</u>	17
2.5	<u>Base de datos de atributos</u>	17
2.5.1	<u>Tablas de entidades-espaciales</u>	19
2.5.2	<u>Tablas de clases-primarias</u>	19
2.5.3	<u>Tablas secundarias</u>	19
2.5.4	<u>Tablas de apoyo</u>	19
2.6	<u>Diagrama de relación-entidad</u>	20
<u>3</u>	<u>EJEMPLO DE UNA SGDB TIPO ENTIDAD</u>	21
3.1	<u>Polígonos, líneas y puntos de unidades de mapeo</u>	21
3.1.1	<u>Tablas de entidades espaciales</u>	21
3.1.2	<u>Tablas de clases primarias</u>	22
3.1.3	<u>Tablas secundarias</u>	23
3.1.4	<u>Tablas de apoyo</u>	24
3.1.5	<u>Simplificaciones de esta estructura</u>	25
3.2	<u>Observaciones</u>	26
3.3	<u>Consistencia lógica</u>	26
3.3.1	<u>Dentro las columnas</u>	26
3.3.2	<u>Entre columnas</u>	27
3.3.3	<u>Entre filas</u>	27
<u>4</u>	<u>ESTRUCTURA DE UNA SGDB TIPO CONTINUA</u>	28
<u>5</u>	<u>CONSTRUYENDO UNA SGDB</u>	29

5.1	Necesidad de evaluación & diseño del sistema	29
5.2	Aspectos geométricos	30
5.2.1	Exactitud vs. precisión	30
5.2.2	Ubicación del punto	31
5.2.3	Límites geoméricamente corregidos a partir de fotografías aéreas	32
5.2.4	Utilizando imágenes de satélite como mapa base	34
5.2.5	Límites geoméricamente corregidos a partir de mapas de suelos publicados	35
5.2.6	Consistencia geométrica	36
5.3	Aspectos temáticos	36
5.3.1	Reglas de empresa	36
5.3.2	Columnas codificadas	37
5.3.3	Columnas numéricas	37
5.3.4	Columnas de texto no codificadas	37
5.3.5	Otras columnas no estructuradas	38
6	CONSULTANDO UNA SGDB	39
6.1	Búsquedas espaciales	39
6.2	Búsquedas no espaciales	39
6.3	Búsquedas mixtas	40
7	CARTOGRAFIA	41
7.1	Colores	41
7.2	Mapas de polígonos	41
7.2.1	Reduciendo un mapa de polígonos a una escala mas pequeña	41
7.2.2	Agrandando un mapa de polígonos a escala mas grande	43
7.3	Mapas tipo Grilla	44
7.3.1	Reduciendo la resolución de un mapa tipo grilla	44
8	METADATOS	45
8.1	Fuentes de Metadatos	46
8.2	Metadatos de suelos	46
9	EL USO DE PROGRAMAS DE BASE DE DATOS DE SUELOS EXISTENTES	47
9.1	Base de Datos Multilingüe de Perfiles de Suelos (SDBmPlus 2.01 [15])	47
9.2	WinPedon (1.1.2) [42]	54
10	ABREVIACIONES	56
11	BIBLIOGRAFIA	57

1 ESQUEMA CONCEPTUAL

Conceptos clave en este Capítulo:

- Definición de una Base de Datos Geográfica de Suelos (SGDB por sus siglas en ingles).
- Propósitos de una SGDB
- Preguntas a ser respondidas por una SGDB, 1) para una área de estudio completa; 2) en un sitio; 3) buscando áreas de interés.
- Clases de suelo vs. propiedades de los suelos
- Definición de "suelo" como es representado en una SGDB
- Niveles de abstracción: 1) conceptual, 2) lógica (datos), 3) modelos físicos del espacio.
- ¿Por que lo suelos varían en el espacio? Efectos determinísticos vs. efectos al azar, la ecuación de Jenny.
- Rango largo vs. rango corto de la variabilidad de los factores formadores del suelo.
- Modelos de la variabilidad espacial del suelo: Discreto (DMSV); Continuo (CMSV); Mixto (MMSV).
- Modelos del espacio lógicos: entidad topológica vs. grilla

Una Base de Datos Geográfica de Suelos (**SGDB**), es una estructura digital de datos que contiene información acerca de la distribución geográfica y propiedades de la cobertura del suelo en un área específica. Representan el reemplazo digital para los mapas y reportes resultado de un levantamiento de suelos, pero pueden ser mucho más útiles que sus predecesores (papel) por todas las ventajas que una base de datos digital posee en sus diversos campos de aplicación.

La SGDB tiene diversos **propósitos**:

1. **Organización** de datos: para mostrar la relación lógica de los datos, por ejemplo, una calicata o perfil de suelo esta compuesta de una secuencia de horizontes; una unidad de mapeo esta compuesta de varios tipos de suelo;
2. **Almacenamiento** de datos: para guardar o almacenar los datos para un uso posterior.
3. **Recuperación** de datos: para examinar los datos almacenados.
4. **Manipulación y transformación** de datos: para derivar nuevos a partir de los datos almacenados; por ejemplo, información respecto a una unidad de mapeo completa derivada de información a partir de sus constituyentes.
5. **Análisis de datos**: para resolver problemas utilizando los datos, por ejemplo en evaluación de tierras; evaluación del riesgo medioambiental; recomendaciones de manejo de suelos.

Mas allá de que en primera instancia el propósito principal de una base de datos sea el almacenamiento de datos, esta no es por si misma una motivación suficiente para construirla. Esencialmente, las bases de datos son construidas para que las preguntas puedan ser respondidas. De manera de responder una amplia variedad de preguntas, algunas no anticipadas a la construcción de la SGDB, se requiere de una estructura sólida. Para juzgar si una SGDB ha sido bien diseñada y correctamente construida, necesitamos juzgar simplemente si esta puede proveer información como la requerida por modelos analíticos.

1.1 Preguntas que puede responder una SGDB

Siguiendo el trabajo de levantamiento de suelos de Beckett & Burrough [2], podemos clasificar la preguntas en:

1. Sintetizando un área de estudio completa

- (a) ¿Qué **clases de suelo** están presentes en el área?
- (b) ¿En que **proporción** ocurren?
- (c) ¿Qué proporción del área de estudio esta ocupada por suelos con **propiedades específicas**?

El primer grupo de preguntas requiere solamente de procedimientos (sólidos) de muestreo estadístico (punto o área) y no un mapa. El único interés en estas preguntas será para un inventario a nivel nacional. Una SGDB usualmente responde estas preguntas extrayendo información geográficamente explícita.

Para la mayor parte de procesos de toma de decisiones, también requerimos saber la **distribución geográfica** de suelos, es decir, estos deben mostrarse en un mapa, el cual dentro la SGDB es representado en formato digital. Con ese tipo de mapa, podemos responder las siguientes preguntas:

2. En un sitio dado

- (a) ¿Cuál es la **clase de suelo** en un **sitio específico**?
- (b) ¿Cuáles son las **propiedades del suelo** en ese sitio? ¿cuan **variables** son?
- (c) ¿Cuál es el **patrón espacial** de las **clases de suelo** en el sitio o alrededor de el?
- (d) ¿Cuál es el **patrón espacial** de las **propiedades del suelo** en el sitio o alrededor de el?

El grupo anterior de preguntas puede ser requerido por usuarios de la tierra quienes poseen parcelas de tierra específicas y por planificadores que ya identificaron áreas específicas cuyo uso y manejo debe ser planificado.

Así mismo, con un mapa, podemos responder a las siguientes preguntas:

3. Ubicando áreas de interés

- (a) ¿Dónde se puede encontrar una clase de suelo específico?
- (b) ¿Dónde se puede encontrar un suelo con propiedades específicas?
- (c) ¿Dónde se puede encontrar un patrón espacial de las propiedades del suelo específico?

El grupo anterior de preguntas puede ser demandado por planificadores y usuarios de la tierra que buscan tierras en las que puedan implementar sus actividades.

El último grupo de preguntas, requiere que cubramos el área de interés con predicciones acerca de la cobertura del suelo, de tal forma que en cualquier sitio (muestreado directamente o no), podamos responder esas preguntas.

Algunos puntos respecto a estas preguntas

1. Clases vs. propiedades:

Las **"clases"**, son **categorías de un sistema de clasificación**, ya sean predefinidas o reconocidas durante el levantamiento como elementos naturales del paisaje.

Las **"propiedades"**, son **Características de la Tierra que se pueden medir**, por ejemplo, pH del suelo; o Cualidades de la Tierra que pueden ser inferidas, por ej. el grado de toxicidad a una variedad de planta específica. A menudo, el levantamiento de suelos y también la SGDB, utilizan clases para organizar conjuntos de propiedades (covariantes) de cuerpos naturales de suelo.

2. **Escala implícita** de estas preguntas: los conceptos de "sitio" y "área" implican una escala de interés y por ello estas preguntas cambian su significado dependiendo en la escala implícita.

3. **Patrones espaciales**: algunas interpretaciones requieren un patrón espacial específico de los diferentes tipos de suelo a una escala de terreno específica. Algunas veces no es suficiente conocer la proporción de suelos en un "sitio" o en un área, mas bien el patrón espacial en el que ellos ocurren.

Pregunta relacionada

1. ¿Cuan confiables son estas afirmaciones? ¿Hasta que grado un tomador de decisiones puede confiar en ellas? Esto requiere una evaluación de la exactitud ya sea cuantitativa (comúnmente probabilística) o cualitativa con respecto a las preguntas. La SGDB debe contener información para permitir la realización de inferencias respecto a la confiabilidad de las predicciones.

Ejemplo de preguntas que una SGDB ayudó a responder

1. ¿Cuál es el almacenamiento total de Carbono en los suelos de Norte América (Canadá, USA y México)? ¿Qué proporción de este es probable que se pierda en la atmósfera como resultado del cambio en el uso de la tierra o el mejoramiento de tierras como el drenaje?
2. ¿Dónde se encuentran las zonas con "alto potencial agrícola" que deben recibir la prioridad de protección del crecimiento urbano?
3. Para cada terreno en un área agrícola, ¿cuál es la cantidad máxima permisible de estiércol que debe ser aplicada por año teniendo en cuenta el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas?

1.2 ¿Qué se representa en una SGDB?

En primer lugar, la Base de Datos Geográfica de Suelos representa la cobertura del suelo, así mismo, los puntos de observación del suelo (calicatas). Pero, a que nos referimos exactamente?

1.2.1 ¿A que nos referimos por suelo?

Esta pregunta puede ser respondida desde tres puntos de vista: conceptual, funcional y desde un punto de vista práctico.

Conceptual: una definición simple y aceptable es provista por [3, 28]

"El suelo es la capa superior de la corteza terrestre, la cual puede soportar el crecimiento de plantas y que al mismo tiempo ha sido alterada por la acción de procesos físicos, químicos y biológicos" (mi traducción).

Los autores aclaran lo siguiente: "por tanto, las rocas y sedimentos sueltos no son considerados suelo desde un punto de vista edafológico". Otros ejemplos de elementos no considerados como suelo son los cuerpos de agua, dunas, etc. Desde ese punto de vista, el suelo es un tipo especial de cuerpo natural que es estudiado por los Pedólogos.

Funcional: el suelo es la capa superior de la corteza terrestre que representa la **interfase** medioambiental entre la atmósfera, biosfera, litosfera, hidrosfera y antroposfera. Desde un punto de vista funcional, cualquier objeto que actúe como esta interfase debe ser considerada "suelo", al menos con fines de mapeo. Esto incluye materiales terrestres que no son suelo (desde un punto de vista edafológico) como los sedimentos sueltos del subsuelo, dunas y rellenos sanitarios.

Todos los materiales no-consolidados que se encuentran por debajo de la superficie terrestre exceptuando aquellos bajo agua, se definen como **regolito**. Para la comprensión de algunos procesos medioambientales es importante considerar todo el regolito.

Practico: el levantamiento de suelos opera desde la superficie, la cual es fácilmente observable, hacia abajo. Cuanto mas lejos de la superficie, cuanto mas costosa y difícil la observación. Es impractico observar por debajo de 1.2 m (el limite de profundidad típico de un barrenos), excepto en puntos dispersos. Por lo que un mapa de "suelos" de hecho esta basado en observaciones a esta profundidad superficial. Afortunadamente, en muchos paisajes, la variabilidad espacial del regolito es menor a mayores profundidades, y muchas características de un regolito profundo pueden ser inferidas de capas mas superficiales.

1.2.2 ¿Qué se representa?

Una SGDB representa una área especifica de la superficie de la tierra. El "suelo" según cualquiera de las definiciones anteriores, no siempre cubre el área de estudio, esto debido a las siguientes razones.

1. Pueden presentarse áreas "faltantes" que no son consideradas en el mapa; estas se encuentran en el mapa en blanco (es decir, no clasificadas) y no tener información en las tablas de atributos. Esas áreas son **terra incógnito**. Estas incluyen zonas que pueden encontrarse fuera del área de estudio o huecos dentro la misma que por alguna razón no pueden mapearse, o que han sido omitidas de forma deliberada.
2. Las **áreas urbanas** o **construidas** también pueden ser consideradas faltantes o no tomadas en cuenta ya sea porque, esos suelos no son considerados dentro el objetivo del levantamiento de suelos (por ejemplo, agricultura), o porque los suelos se encuentran muy disturbados para ser mapeados. En el levantamiento de suelos moderno, las áreas urbanas son mapeadas debido a la importancia que representa el suelo para sus diferentes aplicaciones: obras civiles, polución, diseño de rellenos sanitarios, parques, etc., para ello se diseña un tipo de unidades de mapeo especial. El suelo o regolito que se encuentra actualmente bajo un edificio no puede ser mapeado de forma directa; mas bien se infiere a partir del suelo presente alrededor del mismo.
3. Algunas áreas son etiquetadas (clasificadas) por el mapa, pero son **no-suelo** por cualquier definición del recurso "suelo". Algunos ejemplos son los cuerpos de agua y las rocas. Estos reciben una clase, pero en general no contienen información de sus atributos dentro la SGDB; estas clases tendrán sus atributos descritos en sus respectivas bases de datos temáticas (por ejemplo, tipo de roca, calidad del agua.....).
4. Algunas áreas son etiquetadas y consideradas suelo por algunos aficionados, sino por todos los pedologos. Estos corresponden materiales térreos (no agua o roca madre) que no son fácilmente clasificados como suelo. Como ejemplo tenemos las canteras, depósitos mineros y rellenos sanitarios. Estos reciben una etiqueta o clase y talvez algunos atributos. Son importantes como interfases medioambientales. En algunos levantamientos, son llamados **tipos**

de tierra misceláneos, pero se los considera de manera progresiva como suelos que deben ser descritos y clasificados.

1.2.3 ¿Qué tiene de especial una SGDB?

Una SGDB tiene algunas características especiales que la hacen más que una simple base de datos geográfica genérica.

1. Los suelos son cuerpos **tri-dimensionales**; de esa manera, la base de datos no solo describe la superficie (dos dimensiones), sino también la profundidad (tercera dimensión) usualmente considerada como los horizontes, pero algunas veces simplemente como capas de muestreo.
2. Los cuerpos suelo representados en el mapa son **heterogéneos**, es decir, no en todos los lugares son idénticos dentro de una delimitación o incluso dentro de un píxel. A pesar de ello, esta heterogeneidad puede muchas veces ser descrita por un análisis geomorfológico, muestreo clásico, o técnicas geoestadísticas.
3. El suelo como tal es difícil de mapear ya que no puede ser fácilmente observado. Algunos paisajes son más fáciles de mapear que otros. Los mapas resultantes varían ampliamente en **calidad** geométrica como temática.
4. El tipo de **demandas o preguntas** que se hace a la SGDB es complejo y muchas veces implica información a diferentes y variados niveles conceptuales.

1.3 Representando el espacio en una SGDB

Podemos distinguir tres niveles de abstracción cuando discutimos el aspecto espacial:

1. **Conceptual:** como concebimos el espacio; como pensamos que los fenómenos que tratamos de mapear se encuentran organizados. Este es nuestro modelo mental, pero todavía no es lo suficientemente específico para trabajar.
Ejemplo: el espacio como entidades discretas; el espacio como campos continuos; Modelo Discreto de Variabilidad Espacial; Modelo Continuo de **Variabilidad Espacial**.
2. **Lógico:** como el modelo conceptual del espacio es materializado de forma matemática y lógica, de manera que podamos razonar y calcularlo. Este es un modelo lógico que puede posteriormente ser materializado en la computadora. Este es conocido como el **modelo de datos**.
Ejemplo: entidades topológicas; grilla
3. **Físico:** cuán lógico las entidades espaciales son actualmente almacenadas en formato digital, donde deben ser manipuladas.
Ejemplo: raster, vector, quadtrees.

Los modelos físicos son importantes solamente para los informáticos o ingenieros de sistemas quienes implementan los SIG, DBMS y herramientas similares que son utilizadas para construir una SGDB. Los dos niveles restantes, conceptual y lógico, deben ser armonizados para el diseño de una SGDB.

1.3.1 Variabilidad espacial del suelo

Los modelos conceptuales sobre la distribución espacial de los suelos deben corresponder a la realidad de la geografía del suelo que intentan conceptualizar. Describiremos, como ocurre que los suelos no sean iguales de un lugar a otro y como esperamos que esta variabilidad ocurra. Distinguimos entre la variabilidad espacial debido a causas naturales y a aquella debida a la actividad humana, ya que ambas tienen causas diferentes resultando en patrones de variabilidad diversos.

Por supuesto que muchos suelos "naturales" tienen alguna influencia humana y viceversa.

Suelos Naturales

La variabilidad espacial de los suelos **naturales** resulta principalmente de la interacción (espacialmente-variable) de los **factores formadores del suelo** y en teoría deben ser explicados por estos. La evidencia principal para esta teoría es que no todas las posibles combinaciones de las propiedades del suelo ocurren en la naturaleza; al contrario, las propiedades co-varían de acuerdo al ambiente pedogenético, lo que hace posible reconocer suelos "típicos" o "conceptos centrales" para diferentes ambientes, así como etapas intermedias que corresponden a transiciones entre estos. El mapeo y caracterización de la variabilidad espacial del suelo en base al modelo pedogenético, ha sido la actividad principal de los Edafólogos (Pedólogos) desde el inicio de la geografía del suelo en la época de Doukachaev. Buol et al. [4], presentan una revisión histórica de la geografía del suelo; Burrough [7], revisa la literatura más relevante. Wilding & Drees [46], revisan los métodos para el estudio de la variabilidad espacial y abstraen resultados como, ¿cuán variable son las propiedades del suelo en la naturaleza?

En teoría, la variabilidad espacial del recurso suelo puede ser explicada por los factores formadores del suelo, los cuales se encuentran bien resumidos en la ecuación de Jenny [23-25, 32]:

$$S = f (cl, o, r, p, t)$$

Es decir, el suelo resulta de la acción del clima (precipitación, temperatura....) y los organismos (plantas, animales, microbios), sobre un material parental inicial en una posición de relieve específico, en el tiempo. Estos factores, y el suelo resultante, pueden ser considerados parcialmente *determinístico* y parcialmente *estocástico*. Adicionalmente, cuando nuestra comprensión sobre procesos determinísticos se completa, podemos utilizar métodos estadísticos para

caracterizar los resultados, sin asumir que de hecho el proceso es estocástico. Muchos experimentos (por ejemplo, [26, 30]) y estudios geoestadísticos (por ejemplo [43]), han demostrado que algunas propiedades edáficas pueden ser altamente variables, incluso dentro áreas muy pequeñas, donde presumiblemente los factores formadores del suelo son similares a uniformes. Ha sido también sugerido, que los factores formadores del suelo pueden ser caóticos a escala de campo [33]. El análisis de fractales puede ser una herramienta útil para caracterizar este tipo de variabilidad [6].

Los factores formadores del suelo pueden variar en el espacio desde **gradualmente** hasta **abruptamente**; el rango al cual un factor es independiente, es su **rango**. El mismo factor puede tener rangos diferentes, dependiendo en el contexto. Por ejemplo, la cantidad y tipo de precipitación anual varía generalmente de forma gradual en el orden de 10s (decenas) a 100s (centenas) de kilómetros; por otro lado, en una región con una fuerte precipitación orográfica y vientos direccionales, el rango puede ser mucho menos.

Suelos influenciados por el hombre

La variabilidad espacial de los suelos **influenciados por el hombre** resulta principalmente de la perturbación e insumos de la actividad humana, usualmente sobre un suelo natural. En un extremo, los suelos son creados por la actividad humana a partir de materiales terrosos, por ejemplo, desechos mineros. Las alteraciones pueden ser menores (por ejemplo, labranza superficial, fertilización leve) a extremas. El hombre decide donde y como manejar los suelos, por lo que la variabilidad en teoría puede ser reconstruida a partir de datos históricos. En la práctica, puede ser inferido a partir de la observación de los patrones espaciales.

1.3.2 Modelos conceptuales del espacio

Heuvelink [19], propone dos formas fundamentales para mostrar la distribución espacial de los suelos: el **Modelo Discreto de Variabilidad Espacial** (DMSV) y el **Modelo Continuo de Variabilidad Espacial** (CMSV); estos pueden combinarse en el **Modelo Mixto de Variabilidad Espacial** (MMSV).

Modelo Discreto de Variabilidad Espacial: DMSV

En el DMSV, todos los cambios (mapeados) en las propiedades del suelo se consideran que ocurrirán en los **límites** entre polígonos, y la variación interna dentro un polígono no es mapeada, simplemente caracterizada a través de términos estadísticos no-espaciales y términos descriptivos, por ejemplo, la *consociación, asociación o complejo* del Manual de Levantamiento de Suelos (Soil Survey Manual) [39]. El DMSV conforma el modelo "entidad-clase" de un polígono dentro el SIG: cada punto en el mapa se encuentra exactamente dentro un polígono, cada polígono se encuentra exactamente dentro una clase o categoría de la leyenda, finalmente, cada clase es descrita en la base de datos a través de sus atributos.

Este modelo conceptualiza la situación en la que los factores formadores del suelo cambian a través de **limites bien definidos**. Nosotros reconocemos las **zonas de transición**, pero ellas son pequeñas respecto a los polígonos que circundan, lo cual para un DMSV puro representan insignificantes a escalas de mapeo realísticas. Este modelo es consistente con el mapeo de suelos que utiliza interpretaciones geomorfológicas a través de fotografías aéreas como el primer medio de estratificación espacial.

Como ejemplo de un limite bien definido, tenemos el factor **P** (material parental), donde dos tipos de rocas contrastantes como la piedra caliza y el esquisto tienen contacto.

Modelo Continuo de Variabilidad Espacial: CMSV

En el CMSV, se asume que la variabilidad espacial es continua y que el mapeo se lleva a cabo a través de muestreo e interpolación, utilizando técnicas de estadística espacial. En los últimos 25 años, se puso mucho esfuerzo en caracterizar la cobertura del suelo como un continuum. Las técnicas de geoestadística, desarrollada inicialmente para la industria minera, ha sido ampliamente aplicada en la ciencia del suelo. Una buena introducción a estas técnicas en el contexto de la Geología lo da Davis [11]; un tratamiento mas detallado y entendible se encuentra en [22]; un explicación simple en el contexto de la ciencia del suelo es dado en [31]; un libro de texto con ejemplos edafológicos es [45]; un programa para el análisis geoestadístico y mapeo, que incluye el EPA's *GEOEAS*, Deutsch's *GSLIB* [14], y la Universidad de Utrecht *GSTAT* [32], así como programas comerciales como son VarioWin y Surfer.

Este modelo conceptualiza la situación en la que los factores formadores del suelo cambian gradualmente, o son aparentemente al azar. Estos son los dos extremos de la escala de dependencia espacial, es decir, hasta que grado el conocimiento de las propiedades del suelo en un lugar, puede ayudarnos a predecir las propiedades del suelo en lugares "vecinos". En su forma pura, este modelo no conceptualiza la situación en la que los factores formadores del suelo cambian a limites naturales mas o menos abruptos.

Un ejemplo del **efecto gradual** con **largo-rango** de dependencia espacial, para el factor **P** (material parental), es el espesor de un estrato loess a favor del viento desde su fuente.

Un ejemplo del aparentemente **efecto al azar** con rango-corto de dependencia espacial, para el factor **p** (material parental), es un estrato horizontal de piedra caliza que tiene solución diferencial, por lo que el suelo que yace encima, tiene bolsones de solución profunda dentro de un estrato superficial sobre la roca madre.

El CMSV, usualmente se aplica a propiedades edáficas individuales, es decir, se genera un mapa individual para cada propiedad. Adicionalmente, las muestras representan horizontes o profundidades específicas, por lo que se producen mapas

individuales para cada profundidad u horizonte, aun para la misma propiedad. Sin embargo, se pueden incluir restricciones en el modelo para recuperar correlaciones conocidas de muchas variables.

Modelo Mixto de Variabilidad Espacial: MMSV

Los Geógrafos del suelo y Pedólogos, reconocen que ambos modelos DMSV y CMSV, son validos hasta cierto grado: el DMSV donde los factores formadores del suelo cambian relativamente de manera abrupta en limites naturales, y el CMSV, donde los limites son difusos o no existentes e incluso dentro cuerpos de suelo "discretos" donde existe dependencia espacial. Esto lleva a un modelo de variabilidad espacial híbrido en el que se realiza una estratificación inicial dentro unidades de mapeo basadas en el DMSV, para mejorar la interpolación basada en el CMSV. Un método es Universal Kriging, el cual utiliza una función de escalón en lugar de una tendencia de alisamiento; una técnica relacionada es Ordinary Kriging con external drift. Otra síntesis de los dos modelos es el *análisis de patrón*, donde se analiza la forma y tamaño de los polipedones.

DeGruijter *et al.* [13], argumentan otro modelo mixto, que sea capaz de producir mapas de clases de suelos continuos definidos por fuzzy *k*-means. Ellos establecen que:

"El modelamiento de la distribución del suelo debe estar basado en un nuevo paradigma de clasificación: aquel de la teoría fuzzy set. En el espacio geográfico, este facilita la representación de transiciones graduales así como abruptas, es decir, los modelos de distribución del suelo que pueden predecir variables a nivel de pedon.

....Para la interpolación de la membresía de la clase, desarrollamos un nuevo método, Compositional Kriging, el cual toma en cuenta que las membresías tienen la estructura de datos composicionales: ellos deben ser positivos y totalizar una constante (1) para cada individuo."

1.3.3 Modelos lógicos espaciales

El DMSV y CMSV, corresponden medianamente a los bien conocidos modelos de "entidad topológica" y "grilla".

Nota: muchas veces estos son los llamados modelos "vector" y "raster"; pero estos términos se refieren mas propiamente a modelos físicos, ver a continuación.

Entidad topológica:

En este modelo lógico, las **entidades** geométricas que incluyen puntos, poli líneas y polígonos, se forman con **consistencia topológica**, es decir, restricciones en su arreglo y conexión. Estas entidades corresponden a los objetos conceptuales, por ejemplos, los cuerpos suelo.

En una SGDB, este modelo es ligado al concepto de cuerpo de suelo (polígonos) de DMSV. El suelo es representado principalmente como polígono, pero también las líneas y puntos pueden ser utilizados para cuerpos de suelo que son muy pequeños y delgados (que no pueden ser representados como polígonos).

Los puntos también representan **observaciones de campo (calicatas)**.

Grilla:

En este modelo lógico, la única entidad espacial es la **celda (pixel)**, es decir, un área pequeña predefinida. El conjunto de celdas conforman el área de interés. Las celdas tienen una sola relación topológica llamada adyacencia, la cual se encuentra implícita en su posición dentro la grilla. Este representa un buen ajuste al modelo de datos CMSV que caracteriza a la Teledetección o Sensoramiento Remoto, interpolación geoestadística y los DEMs. El campo "continuo" está más o menos representado como una grilla fina.

La celda contiene una etiqueta, que puede representar una **clase** de suelo o un valor de una **propiedad del suelo**. En el segundo caso, es común para la SGDB estar formada de muchas grillas geográficas idénticas, cada una con una propiedad separada, implícitamente relacionada a su posición definida en la grilla.

1.3.4 Modelos físicos

La implementación de un SIG, se encuentra bien explicada por Burrough [8] y la implementación de una base de datos de atributos por Date [10]. Para cada modelo lógico, muchos modelos físicos pueden ser utilizados. Algunos pueden tener ventajas prácticas o conceptuales.

2 ESTRUCTURA DE UNA SGDB TIPO ENTIDAD

Conceptos clave en este Capítulo:

- ❑ La SGDB consiste tanto de información espacial como de atributos.
- ❑ Espacial: polígonos (cuerpos de suelo), líneas (límites y cuerpos de suelo), puntos (observaciones o calicatas y cuerpos de suelo).
- ❑ Los Atributos pueden ser almacenados en todos los objetos individualmente o en grupos.
- ❑ Escala del mapa; Área Mínima Legible; Delineación Mínima Legible
- ❑ Unidades de Mapeo (categorías de la leyenda) relacionadas una-a-muchas con los cuerpos de suelo.
- ❑ Bases de datos relacionales; tablas; filas (=registros), columnas (=campos), claves, celdas.
- ❑ Tablas de atributos: (1) entidad-espacial, (2) clase-primaria, (3) secundaria
- ❑ Diagrama entidad-relación

Una SGDB orientada a la entidad, consiste de dos tipos de información sobre la entidad, la **espacial** y **atributos**. Adicionalmente, existen una serie de **relaciones** que definen los enlaces entre ellas.

1. **Espacial** (el mapa). Los objetos geográficos en una SGDB orientada-a-la-entidad son de tres clases:
 - a. **Polígonos**, representando **delineaciones** de las **unidades de mapeo**;
 - b. **Líneas**, representando **límites** entre las delineaciones, así como **elementos lineales** a la escala del mapa;
 - c. **Puntos**, representando **observaciones puntuales** (sitios de muestreo, calicatas) y **elementos puntuales**.
2. **Atributos** (información acerca de las entidades mapeadas)
 - a. Atributos de **polígonos individuales**, incluyendo su área y forma.
 - b. Atributos de las **clases de polígonos** (unidades de mapeo), incluyendo el tipo de suelo encontrado en los polígonos de la clase y su arreglo espacial dentro los mismos;
 - c. Atributos de los **límites (líneas) de polígonos individuales**, incluyendo su longitud, exactitud y precisión (implícita)
 - d. Atributos de **poli-líneas individuales**, incluyendo su longitud y ancho;
 - e. Atributos de las **clases de línea**, incluyendo el/los suelo (s) o elementos especiales encontrados a lo largo de las líneas de la clase;

- f. Atributos de **puntos individuales**, incluyendo los detalles de la observación;
- g. Atributos de las **clases de punto**, incluyendo el/los suelo (s) o elementos especiales encontrados en los puntos de la clase y el radio de su área asociada.

3. **Relaciones** (enlaces), por ejemplo:

- a. Espacialmente, las unidades de mapeo están hechas de delineaciones;
- b. Temáticamente, las unidades de mapeo están hechas de componentes que no pueden ser mapeados separadamente;

El enlace entre estas es el **nombre del objeto geográfico**. La etiqueta en el mapa, corresponde a una entrada en las tablas de atributos.

2.1 Polígonos

Los polígonos en un mapa, representan áreas de la superficie terrestre.

Consideramos polígonos, a cada unidad del mapa de suelos tipo área-clase. En este modelo, **el área de estudio se encuentra dividida en polígonos** a través de **límites (líneas)**, cada polígono es etiquetado con un **nombre** (clase) de la **unidad de mapeo**, las cuales se encuentran descritas en una **leyenda**. La unidad de mapeo es también conocida como **clase de la leyenda**; de esa manera, el conjunto de clases de la leyenda forma la leyenda final.

Casi todos los mapas (tradicionales) de levantamiento de suelos impresos en papel son de este tipo, y pueden ser representados por el modelo SIG **orientado-a-la-entidad**. Conceptualmente, estos mapas forman parte del modelo discreto de variabilidad espacial (DMSV) [19]: la variabilidad a lo largo del paisaje puede ser dividida en áreas relativamente "homogéneas" a través de límites bruscos.

Ambas, la delineaciones individuales y las unidades de mapeo pueden tener **atributos** no-espaciales.

El **polígono** es la **unidad básica de análisis espacial** porque tiene una ubicación definida. Sus atributos básicos están almacenados en una **tabla de atributos de polígonos (PAT)**, cuya **clave (tabla)** es un único **ID** (identificador) por **polígono**. El ítem mas importante en la PAT es la **unidad de mapeo** (clase) **ID**, la cual es el enlace a los atributos que se aplica a la unidad de mapeo completa.

2.1.1 Polígonos minimamente legibles

El tamaño mínimo de una entidad polígono esta controlado por la fuente del documento. Comenzamos con el concepto cartográfico de **Delineación Mínima**

Legible (MLD) y después la convertimos al mundo real, **Área Mínima Legible** (MLA).

Delineación Mínima Legible (MLD)

Esta representa el área mínima (cm^2_{m}) que puede ser legiblemente delineada **en el mapa**. Es un concepto **cartográfico** algo arbitrario.

De acuerdo al Grupo en Adecuación de los Inventarios del Recurso Suelo de la Universidad de Cornell [18], la MLD es definida como = **0.4 cm^2_{m}** =40 mm^2_{m} . Esta definición esta basada en la observación de que en la mayoría de los levantamientos de suelos publicados existen delineaciones menores a 0.4 cm^2 . En realidad, las delineaciones mas pequeñas son marginalmente legibles, por lo que algunos autores como Vink [44], utilizan áreas mas pequeñas, MLD=**0.25 cm^2_{m}** =25 mm^2_{m} ; esta regla es seguida por algunos programas de mapeo en algunos países, como en Holanda [20], y algunas veces citado en algunos trabajos SIG debido a la importancia de un aumento en la exactitud de métodos automáticos.

(Cornell) MLD: 0.4 cm^2 = 40 mm^2 ~ 6.325x6.325mm; r ~ 3.6 mm

(Vink) MLD: 0.25 cm^2 = 25 mm^2 ~ 5x5mm; r ~ 2.8 mm

Vink, añade una **restricción en el ancho de la delineación**: que la **dimensión mas pequeña ("ancho") de una delineación alargada** (por ejemplo, una unidad de mapeo que sigue el curso de un río, o una tierra fangosa al pie de una colina), **debe ser al menos 2 mm**; otros autores, por ejemplo [20, 32], dan 2 mm como el ancho mínimo absoluto, pero recomiendan 3mm como el ancho mínimo. Por lo que de acuerdo a Vink, la delineación mas angosta debe tener las dimensiones de al menos 2mm x 12.5mm para cumplir su MLD de 25 mm^2 ; utilizando la mas conservativa MLD de 04 cm^2 y 3 mm de ancho, la delineación mas angosta debe tener las dimensiones de al menos 3mm x 13.3mm.

En delineaciones mas pequeñas, en un mapa impreso, el ancho actual de la línea ocupa gran parte de la delineación; por ejemplo, para delinear un círculo de 0.4 cm^2 , un lápiz #00 (ancho de línea 0.30mm) ocupa 8.2% del área del círculo (asumiendo que la mitad de la línea, es decir 0.15mm, cae dentro el círculo); para delinear un círculo de 0.25 cm^2 , ocupa 10.3% del área. El área cubierta actualmente por la línea, representa un área "arbitrariamente clasificada", por lo que debe ser minimizada. Así mismo, en delineaciones mas pequeñas, **no existe espacio para los símbolos**.

Área Mínima Legible (MLA)

La MLA es definida como **el área mínima de terreno que puede ser legible en el mapa**, también definida como la MLD convertida a la escala real utilizando el cuadrado del **numero de escala** (SN). El SN es el denominador del quebrado de la escala, por ejemplo, para la relación de escala 1:50000, el SN es igual a 50000.

$$\text{(Cornell) MLA, ha} = (\text{Numero de Escala} / 1000)^2 / 250.$$

$$\text{(Vink) MLA, ha} = (\text{Numero de Escala} / 1000)^2 / 400.$$

Ejemplo para un mapa a escala 1:50000:

$$\text{(Cornell):} \quad \text{MLA} = (50000 / 1000)^2 / 250 = 2500 / 250 = 10 \text{ ha}$$

$$\text{(Vink):} \quad \text{MLA} = (50000 / 1000)^2 / 400 = 2500 / 400 = 6.25 \text{ ha}$$

Existen dos relaciones útiles para disminuir o aumentar la escala, ambas derivadas fácilmente a partir del hecho de que **el área varía como el cuadrado de la escala lineal**.

- (1) **Dividiendo en dos** la escala, cuadruplica la MLA;
Duplicando la escala, divide la MLA entre 4.

Ejemplos utilizando el hecho de que la MLA a una escala de 1:50000 es 10ha según la definición de Cornell:

$$\text{MLA a 1:100 000} = \frac{1}{4} \times \text{1:50000} = \frac{1}{4} \times 10\text{ha} = 2.5\text{ha}$$

$$\text{MLA a 1:25 000} = 4 \times \text{1:50000} = 4 \times 10\text{ha} = 40\text{ha}$$

- (2) **Dividiendo la escala entre 10**, multiplique la MLA por 100;
Multiplcando la escala por 10, divide la MLA entre 100.

Ejemplos utilizando el hecho de que la MLA a una escala de 1:50000 es 10ha según la definición de Cornell:

$$\text{MLA a 1:50 000} = \frac{1}{10} \times \text{1:50000} = \frac{1}{10} \times 10\text{ha} = 1\text{ha}$$

$$\text{MLA a 1:5 000} = 10 \times \text{1:50000} = 10 \times 1\text{ha} = 10\text{ha}$$

2.2 Unidades de mapeo

La **unidad de mapeo** de un mapa tipo área-clase, es el conjunto de delineaciones las cuales se supone tienen las "mismas" propiedades, excepto su posición geográfica.

Una Unidad de Mapeo \longleftrightarrow **varias delineaciones**

Una unidad de mapeo es también conocida como una **categoría de la leyenda**. La lista de unidades de mapeo es la leyenda del mapa.

De tal manera que existe una **división jerárquica** del área mapeada en ***m*** unidades de mapeo, y después cada unidad de mapeo es dividida en ***n_j*** delineaciones individuales. Cada delineación pertenece exactamente a una unidad de mapeo. Esta es una relación muchos-a-uno entre las unidades de mapeo y las delineaciones.

Área total del levantamiento

Unidad de mapeo 1

Delineación 1.1

Delineación 1.2

.....

Delineación 1.n1

Unidad de mapeo 2

Delineación 2.1

Delineación 2.2

.....

Delineación 2.n2

Unidad de mapeo m

Delineación m.1

Delineación m.2

.....

Delineación m.nm

Las unidades de mapeo son las **portadoras de información** para la evaluación de tierras & manejo no espacial a la escala del mapa, es decir, todas las afirmaciones acerca de la aptitud de uso que no son dependientes de la ubicación, pueden ser respondidas por el análisis de las unidades de mapeo.

2.3 Líneas

Las líneas en el mapa, representan ya sea:

1. **Líneas conceptuales**, por ejemplo, límites administrativos; lo cual no ocurre en el levantamiento de suelos; o
2. **Límites** entre polígonos; o
3. **Áreas** de la superficie terrestre que son **cartográficamente muy angostas** para ser mostradas como polígonos.

2.3.1 Líneas que representan límites

Estas no son usualmente consideradas como elementos separados, simplemente como líneas para separar delineaciones, pero sus características pueden ser importantes, en particular, la naturaleza de la transición a lo largo del límite, brusco a gradual, o el ancho del área de transición.

Leung [27], divide un polígono mapeado utilizando métodos de conjuntos difusos (fuzzy sets), aunque también se pueden utilizar métodos estadísticos, para definir entre una región central (corresponde al concepto de clase), una región de borde (transición entre los conceptos de clases) y un límite (equitativamente a ambas clases). Mark & Csillag [28], desarrollaron una tipología de límites. Parece que estas técnicas pueden ser usadas para categorizar los límites en la SGDB y puede ser útil para interpretaciones espaciales.

2.3.2 Elementos lineales

A cualquier escala de mapa, algunos polígonos son **muy estrechos** para ser representados como tal. Generalmente, estos **son elementos que deben ser <3 mm a la escala del mapa**. Por ejemplo, en un mapa de suelos a escala 1:50000, un cuerpo de suelo mas estrecho que 150 m, no puede ser mostrado como polígono. Aun así, suelos distintos u otros cuerpos pueden existir en el paisaje. El ejemplo clásico corresponden a los **ríos pequeños y patrones de drenaje** con sus respectivos suelos mojados e inundados. Estos pueden ser mostrados en el mapa como la **línea central** del elemento estrecho, y las propiedades de sus suelos considerados como una categoría de la leyenda asociada al elemento linear.

2.4 Puntos

Los puntos en un mapa representan:

1. **Puntos conceptuales**, por ejemplo las calicatas o puntos de observación (aunque estas comprendan una pequeña extensión, 1 m² , se conceptualizan como puntos); o
2. **Áreas** de la superficie terrestre que son **cartográficamente muy pequeñas** para ser representadas como polígonos (ver el subtítulo Área Mínima Legible).

2.4.1 Puntos de observación

Corresponden los sitios actuales de observación (pueden ser calicatas, minicalicatas y/o barrenadas) del edafólogo, sus coordenadas pueden estar incluidas directamente en un GPS o en una fotografía aérea (digitalizada a partir de una ortofoto).

2.4.2 Cuerpos de suelo pequeños (símbolos)

A cualquier escala, algunos elementos son muy pequeños para ser presentados como polígonos. Generalmente, estos son elementos que serán mas pequeños que la Delineación Mínima Legible (40 o 25 mm²) a escala de mapa respectiva. Por ejemplo, en un mapa de suelos a escala 1:50000, un cuerpo de suelo que sea menor que 10ha (Cornell) o 6.25ha (Vink), no podrá ser representado como polígono. El ejemplo clásico representan los pequeños humedales de un área. Estos pueden ser mostrados en el mapa como puntos centrales (centroides) del pequeño elemento, y sus propiedades edafológicas consideradas como una categoría de la leyenda, asociada al elemento puntual.

2.5 Base de datos de atributos

Los elementos clase y elementos individuales están enlazados a una base de datos de atributos, la cual provee de información temática acerca del objeto. El mapa solo muestra la ubicación geográfica y su identificador.

Para la terminología y principios del diseño de una base de datos, se puede consultar un texto estándar como el de Date [10]. Muchos otros textos mas simples, prácticos y accesibles como por ejemplo el de Howe [21].

Las bases de datos de atributos están convencionalmente organizadas como un conjunto de **tablas relacionales**. Una tabla esta definida por muchas **columnas**, una por **atributo** y muchas **filas**, una por ítem. Cada celda en la tabla (intersección fila-columna), contiene una ocurrencia de atributos, es decir, el valor del atributo para el individuo que se encuentra almacenado en esa fila.

Los siguientes términos estándar son utilizados en la descripción de las estructuras lógicas de una SGDB orientada a la-entidad.

Tabla Un conjunto de **filas** que contienen las mismas **columnas**; contiene información de un determinado tipo acerca de un conjunto de individuos.

Columna Un **conjunto de valores** de un **atributo** individual. También conocida como **"campo"**.

Fila Un conjunto de valores de todos los atributos, exactamente un valor para cada columna en la tabla. También conocida como **"tuple"** (de 'múltiple?') o **'registro'**.

Celda Un valor de atributo individual para una fila individual; intersección de fila y columna; la unidad mas pequeña en el almacenamiento de datos.

Clave **Un conjunto** (una o mas) **de columnas**, que juntas **identifican únicamente una fila** dentro una tabla. Nunca dos filas tendrán la misma clave; esto es reforzado por la DBMS.

Llave o clave foránea Una columna que es la clave o llave en otra tabla.

El diseñado de la base de datos, debe decidir donde almacenar cada tipo de información en el conjunto o juego de tablas. Formalmente, el juego debe ser **normalizado** en la **forma tercera normal**, la cual elimina la redundancia; es decir, un trozo de información nunca se repite y todas las relaciones entre tablas debe ser de muchas-a-una. La ventaja es que la DBMS refuerza la consistencia e integridad de datos. Intuitivamente, cada trozo de información es ingresada al nivel mas general posible. En la practica, alguna redundancia puede ser tolerada para la eficiencia, pero esto puede llevar a inconsistencias.

Almacenamos información a nivel individual ('individual-primario') cuando solo se aplica a una instancia individual y el nivel de clase ('clase-primaria') cuando se refiere a todos los objetos en la clase.

Ejemplo: puntos de observación (todos diferentes, por lo que deben ser descritos individualmente) vs. puntos tipo símbolo (todos representan el mismo de área pequeña, por ejemplo, áreas pedregosas, humedales; por lo que pueden ser descritas como una clase).

Las tablas de atributos son de tres tipos: **entidad-espacial**, **clases-primarias** y **secundarias**.

2.5.1 Tablas de entidades-espaciales

Estas se refieren directamente a los objetos geográficos, es decir, los polígonos individuales, líneas o puntos.

La **clave** es simplemente el **identificador interno SIG** del objeto, algunas veces llamado el '**ID interno**'.

En el caso mas simple, no existen **datos** explícitos, pero el SIG mantiene la información sobre los atributos geométricos del objeto, es decir, área y perímetro (para los polígonos), o longitud (para líneas). Los objetos pueden tener identificadores externos, es decir, claves dentro las tablas de clases-primarias. Estas son también conocidas como '**IDs del usuario**'.

En el caso mas general, los **datos** incluyen las observaciones sobre objetos individuales. Por ejemplo, una tabla de puntos de observación puede incluir información referente a la fecha de observación, tipo, autor, etc.

2.5.2 Tablas de clases-primarias

Estas se refieren a categorías de la leyenda, es decir, grupos de objetos de la misma clase (punto, línea o polígono).

La **clave** es el identificador externo de las tablas individuales-primarias dada a la **clase**. Así, la tabla de clase-primaria, se refiere al conjunto de objetos geográficos.

Los **datos** incluyen hechos acerca de la categoría de la leyenda, incluyendo referencias a **tablas secundarias**.

Polígonos: fase; nombre; composición.

2.5.3 Tablas secundarias

Pueden existir muchas tablas mas, referidas a una de las tablas primarias o por otra tabla secundaria.

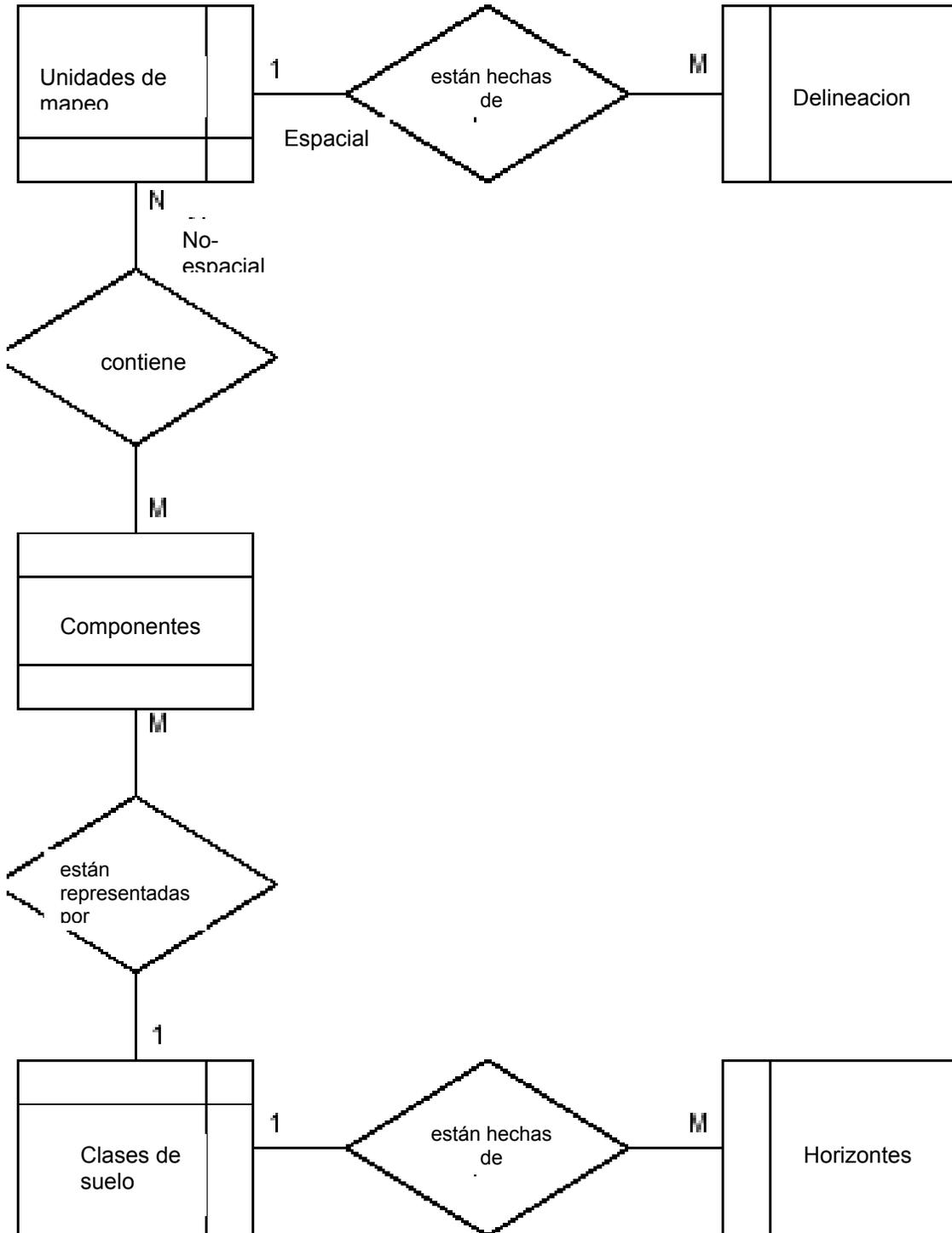
Ejemplo: componentes de las unidades de mapeo; nombre del componente **clave**.

2.5.4 Tablas de apoyo

También llamadas 'tablas de búsqueda'. Estas contienen códigos y sus traducciones para varios atributos en las tablas de clases-primarias y secundarias. Son usadas para mantener la **integridad de datos**. Por ejemplo, una columna en

una tabla secundaria puede almacenar la clase taxonómica de un suelo dominante en una unidad de mapeo como código; una tabla de apoyo contendrá la lista de códigos legales y sus traducciones.

2.6 Diagrama de relación-entidad



3 EJEMPLO DE UNA SGDB TIPO ENTIDAD

Conceptos clave en este Capitulo

- Tablas para el mapa de suelos: Unidades de mapeo, Composición de las unidades de mapeo, Componentes, Clases de suelo, Horizontes de suelo, Códigos.
- Tablas para las observaciones: Observaciones, Horizontes
- Consistencia lógica: dentro una columna, entre columnas, entre filas

Este es un conjunto de **esquemas** de bases de datos. Todas las tablas están normalizadas y tienen claves primarias únicas las cuales se encuentran en **negritas**. La clave puede incluir una o mas columnas. Las columnas en una tabla pueden ser usadas como enlace con otras tablas (es decir, las claves de la 2^{da} tabla, las llamadas **claves foráneas** se escriben en *letra cursiva* con la tabla en la que esta definida después '>>' y en (paréntesis):

Claves primarias: **Como esto**

Claves foráneas: *Como esto* >> (clave primaria de esta TABLA)

Claves combinadas: **Como esto**>> (también es clave primaria de esta TABLA)

Atributos implícitos: (Como esto)

Atributos explícitos: (Como esto)

Dividimos la base de datos en: (1) **polígonos, líneas o puntos de unidades de mapeo**; y (2) **puntos de observación**.

3.1 Polígonos, líneas y puntos de unidades de mapeo

3.1.1 Tablas de entidades espaciales

Tabla: Atributos del polígono (ATP): implícita: limites del polígono

....**Poli_ID**

....(área, perímetro)

....UM_ID>>(UM)

....[otros atributos de polígonos individuales]

Notas: El ATP tiene dos funciones: (1) Enlaza los polígonos cartografiados a una categoría de la leyenda ('unidad de mapeo'), y (2) Permite que las delineaciones individuales tengan atributos mas allá de aquellos en la unidad de mapeo a la cual las delineaciones pertenecen.

Adicionalmente a los **polígonos**, podemos asociar la información de suelos con **líneas** y **puntos**; estos puntos directamente a la tabla componente (abajo), porque

su área es muy pequeña y es difícil imaginar ese tipo de elementos teniendo mas de un componente. Utilizamos líneas y puntos para los casos donde las entidades son muy **delgadas** o muy **pequeñas** en todas sus dimensiones, para ser representadas como polígonos.

Tabla: Atributos de Líneas (ATL): implícita: nodos % vértices del vector ordenadas

....**Arc_ID**
....(longitud)
....**COMP_ID**>>(COMP)
....Arc_Ancho: ancho del cuerpo de suelo asociado con el arc
....[otros atributos de arcs individuales]

Tabla: Atributos de Puntos (ATPn): implícita: ubicación del punto

....**Punto_ID**
....**COMP_ID**>>(COMP)
....Punto_Radio: radio del cuerpo de suelo asociado con el punto
....[otros atributos de puntos individuales]

3.1.2 Tablas de clases primarias

3.1.2.1 Unidades de Mapeo (UM)

Esta tabla brinda los atributos de la unidad de mapeo considerada como un todo, es decir, atributos compartidos por todas las delineaciones y la delineación completa.

Tabla: Unidades de Mapeo (UM)

....**UM_ID**
....UM_Nombre
....UM_Tipo = {Consociacion, Asociación, Complejo,?}
....UM_Patron
....UM_Fase_Pendiente
....UM_Fase_Superficie
....UM_Fase_Erosion
....UM_Fase_Substrato
....[interpretaciones de las unidades de mapeo]

La información de las fases puede también ser aplicada a algunos de los componentes; por ejemplo, si dentro una asociación solo existe un suelo erodado. Entonces, la tabla de componentes será utilizada en su lugar.

En este modelo, las interpretaciones son derivadas al nivel de componente (ver abajo), y la interpretación para una unidad de mapeo se deriva a través de reglas de las interpretaciones de los componentes, dependiendo en la aplicación. Sin

embargo, puede ser conveniente almacenar interpretaciones derivadas en esta tabla.

3.1.2.2 Lista de componentes de la Unidad de Mapeo (COMPUM)

Esta tabla enlaza la unidad de mapeo con sus diversos componentes y también registra cual es la proporción de cada uno de estos dentro de la unidad de mapeo. Esta rompe la relación muchos-a-muchos entre las unidades de mapeo y sus componentes dentro de dos relaciones uno-a-muchos (UM:COMPUM Y COMPUM:COMP). Contiene algún tipo de información de si mismo, sin embargo: la proporción y posición en el paisaje de cada componente.

Tabla: Lista de Componentes de la Unidad de Mapeo (COMPUM2)

....**UM_ID** >>(UM)

....**COMP_ID**>>(COMP)

....COMP_Proporcion: proporción del componente en UM, [0....1]

....COMP_Posición: posición en el paisaje del componente dentro una delineación

3.1.3 Tablas secundarias

3.1.3.1 Componentes (COMP)

Esta tabla brinda los atributos de los componentes de la unidad de mapeo. Un componente puede ser encontrado en muchas unidades de mapeo, pero tiene los mismos atributos sin importar en que unidad de mapeo ocurre. Los componentes consisten de un tipo de suelo (o áreas de tierra miscelaneas), cuyos atributos se encuentran en la tabla enlazada SOL utilizando la columna de enlace SOIL_ID, y puede incluir fases de superficie y substrato. Las fases internas del suelo no son registradas aquí, mas bien en la tabla SOL.

Tabla: Componentes (COMP)

....**COMP_ID**

....COMP_Nombre

....**SOL_ID**>>(SOL)

....COMP_Fase_Pendiente

....COMP_Fase_Superficie_Pedregosidad

....COMP_Fase_Erosion

....COMP_Fase_Substrato

....[interpretaciones de los componentes; por conveniencia, puede ser en otra tabla]

3.1.3.2 Clases de Suelo (SOL)

Esta tabla brinda los atributos de los cuerpos 'naturales' de suelo, sin incluir las fases de la superficie, pero incluyendo fases internas que no son reflejadas en la clasificación. Por ejemplo, 'Fase Tarboro Areno-francoso, lamelica'.

Tabla: Clases de Suelo (SOL)

....**SOL_ID**
....SOL_Nombre
....SOL_ClasTex: nombre en un sistema de clasificación estándar
....SOL_Fase_Interna
....[todos los atributos edáficos, por ej. capacidad de retención de agua en el perfil]

La tabla SOL y su correspondiente tabla HOR (siguiente), comúnmente se refiere a individuos suelo **sintéticos** o **modales**, creados para representar la clase.

Individuo **Modal**: Es una observación individual actual que se piensa es la mejor manera de representar la clase. También es llamado **perfil representativo**. Ventaja: un punto de datos real.

Individuo **Sintético**: No es una observación real, pero una síntesis a través del correlacionador de un individuo 'típico' o 'concepto central' para una clase. Ventaja: puede sintetizar muchas observaciones.

En ambos casos, un correlacionador puede introducir sesgo, ya sea debido a la selección de un individuo modal que no es de hecho representativo, o debido al proceso de sintetizar un individuo que no representa el grupo.

3.1.3.3 Horizontes del Suelo (HOR)

Esta tabla brinda los atributos de horizontes individuales dentro un SOL.

Tabla: Horizontes del Suelo (HOR)

....**SOL_ID**>>(SOL)
....**HOR_NUM**: numero secuencial de horizontes desde la superficie
....HOR_Símbolo: símbolo estandar de la descripción de suelos, por ej. Bt
....HOR_Top: profundidad a la parte superior del horizonte
....HOR_Esp: grosor del horizonte
....HOR_Lim: tipo de limite del horizonte
....[propiedades físicas y químicas del horizonte; por conveniencia, puede estar en otra tabla]

3.1.4 Tablas de apoyo

3.1.4.1 Códigos (CODE)

Tabla: Codigos (CODE)

....**CODE_TIPO**: el nombre de la columna de otra tabla
....**CODE_Codigo**: código
....CODE_Nombre: traducción

Esta es la tabla de apoyo que brinda códigos legales y sus traducciones para todas las columnas.

3.1.5 Simplificaciones de esta estructura

La estructura puede ser simplificada a través de la inclusión de la tabla COMPUM en la tabla UM, siempre y cuando aceptemos un máximo número de componentes.

Tabla: Unidades de Mapeo (UM)

....**UM_ID**
....UM_Nombre
....UM_Tipo = {Consociacion, Asociación, Complejo, ¿}
....[otros atributos de la unidad de mapeo]
....**COMP_ID_1** (>>COMP)
....COMP_Proporcion_1: proporcion del componente 1 en UM, [0...1]
....**COMP_ID_2** (>>COMP)
....COMP_Proporcion_2: proporcion del componente 2 en UM, [0...1]
....[interpretaciones de las unidades de mapeo]

Esta es la estructura utilizada en la base de datos SSURGO. Esta hace que algunas preguntas o búsquedas sean mas difíciles, por ejemplo, la búsqueda de cierto componente en todas la unidades de mapeo.

La estructura puede simplificarse mas a través de la combinación de las tablas del **componente** (COMP) y las **clases de suelo** (SOL). Esta tiene la desventaja de que existe una sola fase de cada clase de suelo.

Tabla: Componentes (COMP)

....**COMP_ID**
....COMP_Nombre
....COMP_ClasTax: nombre en un sistema de clasificación estándar
....COMP_Fase_Pendiente
....COMP_Fase_Superficie
....COMP_Fase_Erosion
....COMP_Fase_Substrato
....COMP_Fase_Interna
....[todas las propiedades edáficas, por ej. capacidad de retención de agua]
....[interpretaciones de los componentes; por conveniencia, en otra tabla]

Entonces, la tabla de Horizontes (HOR) es enclavada por componentes:

Tabla: Horizontes del Suelo (HOR)

....**COMP_ID** (>>COMP)
....**HOR_NUM**: número secuencial de horizontes desde la superficie
....HOR_Símbolo: símbolo estándar de la descripción de suelos, por ej. Bt
....HOR_Top: profundidad a la parte superior del horizonte
....HOR_Esp: grosor del horizonte
....HOR_Lim: tipo de límite del horizonte
....[propiedades físicas y químicas del horizonte; por conveniencia, puede estar en otra tabla]

3.2 Observaciones

Las **observaciones** actuales se encuentran en un conjunto de tablas separadas, relacionadas a unidades de mapeo a través de su **ubicación** (geometría) y por su correlación a un tipo de suelo nombrado. Note que una observación *no* tiene que estar ubicada dentro de una unidad de mapeo a la cual se correlaciona mejor.

Tabla: Observaciones (OBS): implícita: ubicación del punto

....**OBS_ID**

....OBS_Tipo: {calicata, zanja, mini-calicata, barrenada.....}

....SOL_ID>>(SOL): correlación de esta observación a un tipo de suelo nombrado

....[atributos del sitio, por ej. uso actual de la tierra, posición topográfica....]

....[todos los atributos del suelo]

Comúnmente, las observaciones contienen la información en capas:

Tabla: Observación de Horizontes (OBS HOR)

....**OBS_ID** >> (OBS)

....**HOR_NUM:** numero secuencial de horizontes desde la superficie

....HOR_Símbolo: símbolo estandar de la descripción de suelos, por ej. Bt

....HOR_Top: profundidad a la parte superior del horizonte

....HOR_Esp: grosor del horizonte

....HOR_Lim: tipo de limite del horizonte

....[propiedades físicas y químicas del horizonte; por conveniencia, puede estar en otra tabla]

En algunos tipos de observación, puede que la información este incompleta; por ejemplo, cuando se realizada barrenadas, es muchas veces difícil asignar un símbolo al horizonte, aunque la profundidad sea conocida.

3.3 Consistencia lógica

Las estructuras anteriores, aseguran solamente que las entidades sean únicas y correctamente relacionadas en la base de datos. Adicionalmente, quisiéramos asegurar que las entidades sean consistentes lógicamente.

3.3.1 Dentro las columnas

El chequeo mas simple sobre la integridad de datos es para asegurar que todos los datos en una columna simple sean lógicamente posibles.

Para valores codificados, estos deben ser comparados con un **diccionario de datos** para asegurar si estos existen realmente. El diccionario de datos es implementado como una **tabla de apoyo** que es referenciada durante la entrada de datos. Por ejemplo, los limites de los horizontes deben venir de un conjunto guía {a,c,g,d} que quiere decir {abrupto, claro, gradual, difuso}; el color del suelo es descrito por medio de la Tabla Munsell a partir de valores fijos de Matiz, Valor y Croma. El código establecido debe venir de documentos estándar, como por ejemplo la Guía

para la Descripción de Perfiles de la FAO o el Manual para el Levantamiento de Suelos USDA [39].

Para valores **numéricos**, estos deben ser confrontados con **rangos permitidos**, los cuales también pueden ser almacenados en una tabla de apoyo. Por ejemplo, el pH debe estar en el rango de 1-14. Así mismo, la **precisión** de los datos almacenados debe corresponder a aquellas mediciones en el campo o laboratorio. Los manuales de laboratorio relevantes pueden proveer una guía en este tema [1, 38].

Un caso especial es el referido a si se aceptan **valores faltantes**. Algunos no deben ser permitidos, por ejemplo, la profundidad del límite de un horizonte. Otros pueden ser permitidos ya que solo son utilizados para algunos análisis, por ej. el pH.

Un ítem con datos en blanco es ambiguo. Este significa 'ausente' o 'no medido'?. En algunos casos, el significado es claro: para el pH, en blanco significa 'no medido'; el suelo tiene seguramente un pH, aun si no lo medimos. Para la pedregosidad, sin embargo, puede significar 'no registrado' o 'sin piedras'. El diseñador de la base de datos debe especificar la intención. En general, un dato en blanco debe ser utilizado como 'no medido' y la ausencia de un elemento debe ser explícitamente codificada.

3.3.2 Entre columnas

Las columnas en el mismo registro muchas veces tienen relaciones lógicas. Por ejemplo, un horizonte con textura arenosa puede no tener un contenido de agua a pF2 mayor a 20%. Un ejemplo simple es que el %de arena + %de limo + %arcilla = 100% en la fracción de tierra fina.

Estas relaciones deben ser codificadas a través de **reglas** en la entrada de datos o en el programa de validación. Estas requieren conocimiento experto acerca del objeto que esta siendo representado en la base de datos.

3.3.3 Entre filas

Algunas restricciones se aplican a algunas filas. Por ejemplo, en la tabla COMPUM, esperamos que las proporciones de los componentes de la unidad de mapeo sumen 100%, de otra manera, quiere decir que existen áreas que no han sido tomadas en cuenta.

Estas restricciones no pueden ser chequeadas durante al edición de tablas, ya que la tabla es editada fila por fila. Ellas son revisadas cuando la tabla esta cerrada o a través de una rutina especial de 'verificador de consistencia'.

4 ESTRUCTURA DE UNA SGDB TIPO CONTINUA

Conceptos clave en este capítulo

- Llenando un campo espacial o píxel: mediciones directas vs. interpolación
-

En esta sección, consideramos una base de datos tipo continua u orientada al píxel que corresponde al Modelo Continuo de Variabilidad Espacial (CMSV). En este modelo, las propiedades individuales del suelo son representadas sobre la misma grilla. Este se acomoda a los otros modelos de datos tipo continuos como lo son las imágenes satélite, interpolación geoestadística y DEM.

Caso 1: Medición Directa – Las propiedades son medidas en cada celda o punto de la grilla, por ejemplo a través de la Teledetección, tanto los valores brutos o los calibrados son almacenados directamente (por ej. estimaciones del contenido de sales a través de la combinación de bandas TM).

Caso 2: Interpolación – Las propiedades son medidas en los puntos de muestreo u observación e interpoladas sobre toda la grilla a través de técnicas geoestadísticas. Se deben crear dos mapas: (1) mapa de valores, y (2) mapa de error.

5 CONSTRUYENDO UNA SGDB

Conceptos clave en este capítulo

- ❑ Evaluación de necesidades: construyendo el sistema para satisfacer la necesidad del cliente.
 - ❑ Exactitud vs. precisión
 - ❑ Ubicación del punto: GPS, mapas topográficos, fotografías aéreas; máxima exactitud de ubicación.
 - ❑ ¿Cómo obtener límites geoméricamente corregidos a partir de una fotografía aérea?
 - ❑ Imágenes de satélite como mapa base; escala máxima
 - ❑ ¿Cómo obtener límites geoméricamente corregidos a partir de mapas de suelos publicados? Determinando como los mapas de suelos fueron compilados.
 - ❑ Consistencia con otras capas temáticas cartográficas
 - ❑ Consistencia temática
-

Este capítulo discute, los problemas que aparecen cuando se construye una base de datos SGDB a partir de fuentes primarias y observaciones de acuerdo a la necesidad de los clientes. Muchas veces, varias fuentes deben ser integradas, las cuales requieren mayor juicio. En cualquier caso, las decisiones tomadas deben ser registradas por el usuario de la base de datos; este tema es desarrollado en el capítulo 'Metadatos'.

Consideramos de forma separada los dos aspectos principales en el diseño de una base de datos geográfica de suelos: espacial (geometría) y atributos (temático).

5.1 Necesidad de evaluación & diseño del sistema

El primer paso en el diseño de cualquier sistema, esta relacionado a decidir que deberá hacer este una vez construido. A esto se llama 'necesidad de evaluación'. Esta es la única forma de asegurar que el sistema una vez construido, será utilizado y responderá al propósito de su construcción.

En el contexto del diseño de una SGDB, las siguientes preguntas deben ser respondidas en consulta con el cliente.

Aspectos conceptuales

1. **¿Quién utilizara la SGDB?** Esta incluye a los clientes o usuarios **primarios**, es decir, aquellos que manejan y utilizan el sistema directamente; y los

usuarios **secundarios**, es decir aquellos que utilizaran los resultados pero que no manejan directamente el sistema. ¿Cuan amigable con el usuario debe ser el sistema? ¿Cuánto de conocimiento computacional o de levantamiento de suelos los usuarios del sistema deben tener?

2. **¿Qué preguntas el sistema será capaz de responder?** En particular, ¿cuál es la **escala** espacial y detalle temático de estas decisiones? Por ejemplo, considere la diferencia entre tener que modelar los flujos de carbono a escala de campo y escala regional.
3. **¿Que tipo de datos debe almacenar?** La respuesta común es 'todos', pero se debe considerar una negociación entre el gasto de organizar, codificar, verificar y almacenar grandes cantidades de datos; y su utilidad.
4. **¿Existe ya un modelo conceptual bien desarrollado** que debe ser convertido en un modelo lógico, o también debe desarrollarse un modelo conceptual?

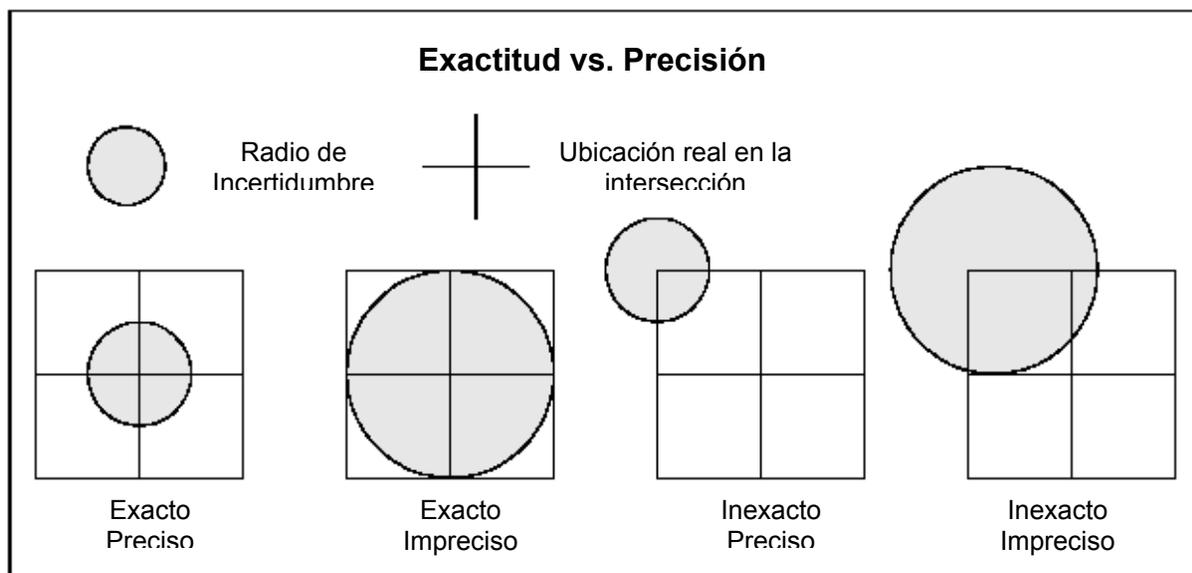
Aspectos del sistema

1. ¿Existen limitaciones o restricciones respecto al **hardware** o **software** que se debe utilizar?
2. ¿Es un sistema **multi-usuario** o **en red** requerido?
3. ¿Cuánto **tiempo** se dispone para construir el sistema? ¿Cuánta **pericia**? Tal vez sea preferible una solución imperfecta que estará disponible rápidamente en lugar de una solución perfecta que nunca será completada.

5.2 Aspectos geométricos

5.2.1 Exactitud vs. precisión

Estos dos conceptos se confunden a menudo. La **exactitud** de un mapa se refiere, a **cuan cerca** un elemento en el mapa se encuentra en relación a su ubicación en la realidad; La **precisión** del mapa se refiere a cuan pequeña es el área de incertidumbre de la ubicación de un elemento. Obviamente, queremos ambas.



5.2.2 Ubicación del punto

La exactitud y precisión de un punto en una SGDB depende de cómo fue obtenido y como fue transferido dentro la SGDB.

Puntos **exactos**: por ejemplo, el levantamiento geodésico de puntos de referencia; estos tienen coordenadas publicadas que pueden ser ingresadas a través del teclado. Su exactitud es esencialmente perfecta y su precisión extremadamente alta, por lo que se convierten en el estándar para los otros puntos.

Puntos medidos con **alta precisión**: por ejemplo, a través levantamiento de datos con un GPS diferencial,; las coordenadas deben ser ingresadas a través del teclado o descargadas directamente del GPS o una estación total; la precisión es conocida a por medio de las características del instrumento (por ej. GPS 'GDOP'); la exactitud depende en las referencias absolutas. De cualquier forma, los valores de las lecturas de los GPS se consideran con alta exactitud, ya que el sesgo es corregido a través de la señal recibida por varios satélites al mismo tiempo.

Para cada método de medición, la exactitud y precisión pueden ser determinadas por medio de **experimentos en campo** a través del método comparación con puntos conocidos.

Puntos medidos con **baja precisión**, pueden ser aquellos obtenidos a través de mediciones con compás a partir de un punto conocido.

Puntos sobre las fotografías aéreas: por ejemplo, observaciones visualmente ubicadas sobre una fotografía aérea. Tres aspectos:

1. ¿Cuan cerca esta el punto marcado en relación al punto real? Esto depende en la densidad de elementos sobre la fotografía aérea y en cuan cerca el punto esta en relación a elementos observables;
2. escala de la foto = error inherente en el marcado del punto sobre la foto (0.25mm).
3. precisión de la georeferenciación de la fotografía aérea para la digitalización (ver abajo).

Puntos sobre los mapas topográficos: se deben considerar los mismos tres aspectos anteriores, excepto por el tercero, ya que es mas fácil.

Error inherente en el ploteo de puntos sobre el mapa: Un **punto bien definido** sobre el mapa, esta definido típicamente por estándares de exactitud de mapas como 0.25mm (_mm) sobre el papel [12]; es decir, el punto debe estar dentro _mm de su posición original 90% de las veces. Esto incluye tanto errores de ubicación y de ploteo. Con la cartografía automatizada, el punto puede ser ploteado con mayor exactitud, pero aun existe el problema de encogimiento y expansión del papel, la incertidumbre en el posicionamiento mecánico del lápiz

para el ploteo, y la ubicación del punto en el campo, por lo que la precisión no es mejor, talvez 0.1mm en el mejor de los casos.

Calculando la máxima exactitud de ubicación [18]

Multiplique el SN por 0.25mm (0.1mm para productos SIG) y después convierta a metros en terreno.

Ejemplo: 1:50000: 50000 mm_t mm_m⁻¹ *0.25mm_m = 12500mm_t = 12.5 m_t (5m_t para un mapa producido en SIG sobre papel estable con un ploter de alta precisión).

Interpretación: es inherentemente imposible plotear un punto mas cerca de 5m, aun en una mapa a escala de 1:50000 generado a través de SIG. Así mismo, una línea no puede tener un ancho <5m, ya que cualquier punto sobre la línea no podrá ser ubicado mas precisamente.

5.2.3 Limites geoméricamente corregidos a partir de fotografías aéreas

El levantamiento de suelos en tiempos pasados estaba basado principal y únicamente en las fotografías aéreas obtenidas a través de vuelos aerofotogrametricos. Las fotografías aéreas pueden ser obtenidas a diversas escalas, pero su utilización estaba principalmente dedicada a estudios de detalle y semi-detalle.

En la actualidad, su uso se vio restringido debido principalmente a la disponibilidad cada vez mas creciente de Imágenes de Satélite de diversa resolución espacial. Las principales diferencias para su uso mayoritario en comparación con las fotografías aéreas, son:

- **Resolución temporal:** las imágenes de satélite dependiendo del sensor, poseen una alta resolución temporal en comparación con las fotografías aéreas; estas ultimas, se obtienen a pedido del cliente, es decir, el cliente debe programar un vuelo fotogrametrico del área de interés en el tiempo y escala requerida y regida por los objetivos del proyecto. Esta es una ventaja principal en actividades de monitoreo.
- **Costos:** comparativamente, un vuelo aerofotogrametrico requiere de una alta inversión, ya que este es programado específicamente para ese proyecto. En el caso de la existencia de fotografías aéreas tomadas por proyectos anteriores, lo que se requiere es hacer una copia de ellas.
- **Procesamiento:** el numero de fotografías aéreas para un área de estudio dependiendo de la escala es muy alto, por lo que su procesamiento para convertirlas en formato digital es mas moroso y requiere de mayor personal. No así la imagen de satélite que dependiendo el sensor viene en escenas que son relativamente grandes y cubren áreas vastas.

- **Errores geométricos:** los errores geométricos de una fotografía son tres: inclinación, radial y de relieve. En cambio, una imagen satélite posee mayor exactitud geométrica. Para mayores detalles respecto a fotografías aéreas, consulte el libro [34].

Al contrario, las ventajas de las fotografías aéreas sobre las imágenes de satélite son:

- **El componente tri-dimensional** (estereoscopia): para el estudio de suelos según la relación suelo-paisaje, requerimos identificar las diferentes unidades paisajísticas o geoformas. Las fotografías aéreas con la ayuda de un estereoscopio de espejos, facilitan la interpretación del relieve de las geoformas, ya que podemos ver con mucha precisión imágenes estereoscópicas. Sin embargo, con el desarrollo tecnológico, es posible a través de la utilización de los Sistemas de Información Geográfica generar Modelos Digitales de Elevación que en conjunción con las imágenes de satélite nos permite producir: Vistas3D, estéreo imágenes e interpretar directamente en formato digital como no los permite el programa ILWIS 3.3. Así mismo, las imágenes ASTER tienen una propiedad estereoscópica específica que hace que se generen imágenes 3D automáticas.
- **La escala y resolución espacial:** como mencionamos anteriormente, las fotografías aéreas se encuentran generalmente a escalas de detalle y por ello son aptas para levantamiento de suelos a detalle, cosa que muchas imágenes económicamente accesible son lo permiten. Por ejemplo, las Imágenes Landsat ETM (30 m de resolución espacial), no son útiles para estudio a detalle, las imágenes ASTER con una resolución de 15 m, tampoco podrían reemplazarlas. Ahora bien, existen imágenes de satélite de resolución como IKONOS, pero por su alto costo su uso no es muy difundido.

Un método efectivo en la delineación de límites es la fotointerpretación estereoscópica de fotografías aéreas, donde se dibujan líneas sobre un acetato, es decir un método analógico. Desafortunadamente, estas fotografías no están geoméricamente corregidas, por lo que el producto es decir los acetatos que contienen las líneas dibujadas a manos tampoco. Para tener un mapa digital correcto, las fotografías aéreas y la fotointerpretación en acetatos deben ser georeferenciadas y corregidas geoméricamente.

Para ello sugerimos que el usuario estudie y aplique el Manual Técnico para la Creación de Foto-Interpretaciones geoméricamente Corregidas, Ortofotos, Fotomosaicos y Mapas Base para un Proyecto SIG desarrollado por Rossiter y Hengl (ITC) y adaptado al español por Vargas [9]. Este representa un manual paso a paso desde el inicio hasta el final y esta basado para su uso con el programa ILWIS 3.1-3, sin embargo, el usuario puede utilizar otros programas, ya que la base conceptual es lo mas importante y esta puede ser replicable a cualquier contexto.

5.2.4 Utilizando imágenes de satélite como mapa base

Como explicamos anteriormente, las imágenes de satélite constituyen una buena opción para la generación de mapas base geoméricamente corregidos. Estas cubren grandes áreas y así proveen vistas sinópticas con una exactitud geométrica bastante buena a escalas medianas y pequeñas.

¿Qué tipo de escalas pueden ser razonablemente utilizadas por imágenes de satélite georeferenciadas? Esto lo podemos descubrir a través del cálculo en base a su resolución espacial, con la premisa de que el mapa base debe proveer la misma precisión que el mapa analógico a la escala dada.

Primero necesitamos entender el concepto **de Error de Posición Inherente (IPE)**. Este representa la máxima distancia en metros en campo, que un punto bien definido puede estar desplazado en la imagen.

La primera limitación sobre la escala es la resolución de la imagen. Las imágenes de satélite tienen una resolución inherente por píxel, por ejemplo, nominalmente Landsat tiene una resolución de 30x30m, una SPOT pancromática 10x10m. La posición real de un punto representado por un píxel (implícitamente, al centro del píxel) puede estar en cualquier lugar del píxel, tan lejano de la mitad diagonal, y así

$$\text{IPE} = (\text{lado del píxel}) \times [\sqrt{2}/2]$$

Para la imagen Landsat TM, esto es aproximadamente $\approx 21.1\text{m}$; para SPOT pancromática esto es $\approx 7.1\text{m}$. Ahora debemos encontrar la escala máxima del mapa para este error de posición. Como la Exactitud Máxima de Ubicación (MLA) en metros en terreno $= \text{SN}/1000 \times 0.25$ (manual) o 0.1 (automática), podemos calcular el máximo SN como:

$$\text{Máximo SN} = \text{IPE},\text{m} \times 4000 \text{ (manual)}$$

$$\text{Máximo SN} = \text{IPE},\text{m} \times 10000 \text{ (automático)}$$

Por ejemplo, si $\text{IPE} = 21.1\text{m}$ para mapas manuales, el Máximo SN = $84400 \approx 1:85000$, lo que significa que una imagen de satélite con 30 metros de resolución espacial, nunca deberá ser utilizada para mapas base a escala mayor a 1:85000. En otras palabras, esa imagen es equivalente a un mapa analógico producido por métodos convencionales a una escala de 1:85000.

Continuando con el mismo ejemplo, un mapa producido bajo técnicas automáticas en SIG, la imagen de satélite será equivalente a un mapa a escala 1:211000. Esto significa que, con técnicas completamente automatizadas, la imagen de satélite será el enlace débil en la cadena de la precisión.

Para las imágenes SPOT pancromáticas, las escalas correspondientes son 1:28400 $\approx 1:30000$ y 1:70700, respectivamente.

Otra limitación sobre la escala es la precisión en la georeferenciación de la imagen. El sistema de procesamiento de imágenes reporta esta precisión en píxeles a través del llamado 'sigma' o valor de error. Si el sigma es mayor que $[\sqrt{2}]/2 \approx 0.707$ píxeles, la georeferenciación es menos precisa que la resolución, y el cálculo previo es repetido con un error de posición inherente = $\sigma \times$ (tamaño del píxel).

No podemos esperar un sigma por debajo de un píxel, si usamos mapas a escalas menores que la Máxima SN (manual) para identificar los puntos de control (GCP). En la práctica, esto significa que se deben usar mapas a mayor escala. Para georeferenciar una imagen Landsat TM, la escala mínima del mapa debe ser 1:50000; para una imagen SPOT Pancromática el mapa debe estar a 1:25000.

Si se realiza un levantamiento de GCP a través de GPS en el campo, se deberá utilizar un sistema GPS con una precisión más alta que la IPE.

5.2.5 Límites geoméricamente corregidos a partir de mapas de suelos publicados

Un gran número de mapas de suelos han sido publicados a lo largo del tiempo y parece mucho más práctico y beneficioso almacenar estos en una SGDB que realizar el levantamiento de suelos nuevamente. El primer paso es determinar cuán exacto geoméricamente es el mapa analógico (en papel); esto viene de saber cómo fue compilado y con algunas pruebas con el digitalizador.

Caso 1: Mapa Topográfico como base

Si las delineaciones del suelo son realizadas sobre un mapa topográfico como base, estas pueden ser digitalizadas directamente. No podemos mejorar las delineaciones del mapa original. Todo lo que necesitamos son cuatro puntos de control de campo, los cuales pueden ser directamente las cuatro esquinas del mapa para registrar el mapa sobre el digitalizador (mesa digitalizadora o en pantalla).

Una vez que las líneas sean digitalizadas, podemos observar algunas discrepancias con otros elementos sobre el mapa topográfico, por ejemplo, ríos, pantanos, áreas rocosas y curvas de nivel. Las líneas deben ser ajustadas de acuerdo a estos elementos.

Caso 2: Foto-mosaicos

Muchos mapas de suelo son dibujados sobre foto-mosaicos con varios grados de control. Las fotografías pueden ser visibles como fondo (como en USA) o no. Acá hay mucha experimentación y error. Es improbable que el mapa entero pueda ser registrado al mismo tiempo. Los puntos de control de campo están típicamente bien definidos a través de elementos culturales como intersección de caminos, las cuales son dibujadas como ayuda sobre el mapa de suelos. En casos extremos, un mapa de suelos 'puro' ha sido producido sin elementos culturales. La única

esperanza es encontrar líneas de suelos que correspondan a elementos topográficos identificables, por ejemplo, riberas de río.

5.2.6 Consistencia geométrica

Cuando un mapa de suelos es utilizado como parte de un SIG, este será combinado con otros mapas. Muchos de ellos representan elementos que están **correlacionados al patrón del suelo**.

Debemos asegurar que los **límites comunes estén representados solo una vez**; por tanto, debemos establecer una **jerarquía** de límites basados en su fiabilidad y relación lógica, así como el proveedor primario de datos, es decir su fuente.

Ejemplo: todos los mapas de suelo delimitan cuerpos de agua (no suelo), los cuales no son caracterizados temáticamente como suelos. Si existe un mapa topográfico estándar, los cuerpos de agua deberán ser digitalizados una vez, preferentemente por la agencia responsable en la elaboración de los mapas topográficos, y después utilizado por el mapa de suelos. Los cuerpos de agua no deberán ser re-digitalizados. Esto puede no funcionar en el caso de cuerpos de agua superficiales, temporales o planos de inundación, si es que el mapa topográfico solo muestra cuerpos de agua profundos.

Ejemplo: un mapa geológico puede mostrar la litología y estructura (por ejemplo, niveles de terrazas), que corresponden a diferencias en los tipos de suelo. Especialmente donde estas sean líneas agudas, identificadas también por los foto intérpretes; estas deberán ser digitalizadas una vez y utilizadas por ambos mapas temáticos.

5.3 Aspectos temáticos

Ver también la sección 'Consistencia Lógica' en el Capítulo anterior 'Ejemplo de una Base de datos orientada a la entidad'.

5.3.1 Reglas de empresa

La base de datos consiste en información lógicamente relacionada. El **modelo conceptual** es en parte determinado por la **naturaleza del objeto** que estamos tratando de describir (cobertura del suelo, observaciones del suelo, clases de suelo.....) y en parte por las **restricciones** de los datos. Estos son comúnmente llamadas **reglas de empresa**, es decir, reglas establecidas por la organización.

Ejemplos: 'Las unidades de mapeo deben ser descritas a partir de uno o hasta dos tipos de suelos sub-dominantes'; 'Las fases de la superficie se aplica a todas las unidades de mapeo, no solo a los componentes'; 'Todos los horizontes con pH en agua < 6 también tienen un pH medido en KCL'.

Estas reglas son incorporadas dentro los metadatos y ayudan al diseño de la base de datos a estructurarla.

5.3.2 Columnas codificadas

Cualquier columna que solo pueda contener un conjunto limitado de valores, deberá ser codificada con códigos y sus traducciones a lenguaje común en una tabla de referencia. La clase 'desconocida' es un valor especial.

Los códigos deben ser escogidos de fuentes estándar, por ejemplo, la Guía de Descripción de Perfiles de la FAO, o el Manual de Levantamiento de Suelos de la USDA [39]. Los códigos de clasificación de suelos pueden ser tomados a partir de los códigos clave de la Taxonomía de Suelo [40] o la Base de Referencia Mundial [17]. Los códigos estándar nacionales e internacionales existen para las divisiones políticas; visitar el sitio de la Organización Internacional de Estándares (ISO), <http://www.iso.ch> ISO tiene algunos códigos relacionados al suelo en ISO 13.080.

Los colores del suelo son descritos por la Tabla Munsell a partir del matiz, valor y matiz del color; para mayores detalles visite la página <http://munsell.com/munsell1.htm>

Es preferible utilizar una lista corta de clases para cada atributo codificado. Las listas más detalladas son más difíciles de aplicar porque son ambiguas. Considere por ejemplo, la clasificación de límites de horizontes de la FAO a partir del juego {a, c, g, d} lo que significa {abrupto, claro, gradual, difuso} y siendo definido por la FAO para representar las zonas de transición {<2cm, 2-5cm, 5-10 cm, >10cm}. Porque no se permite más clases, por ejemplo, código 'ac' que signifique 'abrupto a claro', o 'x' que signifique 'exacto, <1cm'? La primera respuesta es que los edafólogos en campo no serán capaces de aplicar consistentemente estas subdivisiones. La segunda respuesta es que las diferencias no son significantes para la interpretación.

La información extra que es registrada por los edafólogos en campo, puede ser almacenada a través de notas de texto.

5.3.3 Columnas numéricas

Cualquier columna que solo puede contener un **rango limitado** de valores numéricos, debe ser controlada por una **regla de validación** para asegurar que la columna solo contenga valores legales. El valor 'desconocido' debe ser representado por una columna en blanco o un marcador especial 'desconocido', **no** por un valor numérico reservado.

Las columnas numéricas deben almacenar valores con la apropiada precisión, también controlada por la regla de validación. Esta precisión está determinada por la técnica de concurrencia y análisis de datos.

5.3.4 Columnas de texto no codificadas

El texto libre (no codificado) es útil solamente para almacenar e imprimir. El texto es difícil o imposible de recuperar con una búsqueda, esto principalmente debido a

la **inconsistencia de la terminología**. Las únicas columnas de texto que deben estar presentes son los comentarios. Estas pueden entonces ser leídas una por una cuando los registros seleccionados por otras búsquedas son recuperados.

5.3.5 Otras columnas no estructuradas

Otro tipo de información puede ser incluido en formato digital y almacenado en una base de datos. Un buen ejemplo son las **fotos** a cualquier nivel: unidad de mapeo, componente, suelo, horizonte. Estas no pueden ser buscadas, pero si impresas en un reporte, o desplegadas junto a datos estructurados que fueron recuperados a través de una búsqueda.

6 CONSULTANDO UNA SGDB

Conceptos clave en este capítulo

- ❑ Búsquedas (queries): espaciales, no espaciales, mixtas
- ❑ SQL y QBE

Una SGDB es construida para que luego sea utilizada. En esta sección, discutimos como la información es extraída de la SGDB. Nos referimos a la lista inicial (primer capítulo) de preguntas que una SGDB puede responder.

6.1 Búsquedas espaciales

Estas requieren de un SIG.

A una escala dada

Estas incluyen las preguntas acerca de un sitio dado: 'Cual es la **clase de suelo?**'. El sitio es identificado ya sea interactivamente (en la pantalla) o a través de las coordenadas obtenidas de otra fuente (mapa o medición en campo). Esta pregunta es fácilmente respondida debido al enlace entre los datos temáticos o atributos y los datos espaciales.

En un SIG topológico-entidad como lo es ArcGis, la búsqueda de un punto en un polígono identifica la delineación que contiene el punto. En un SIG raster, las coordenadas se refieren a una celda específica. La delineación o celda se refiere a la clase de suelo de las tablas primarias de atributos.

Encontrando un sitio específico:

Estas incluyen las preguntas acerca de un sitio dado: 'Cual es la **clase de suelo?**' en un sitio. El sitio es identificado ya sea interactivamente (en la pantalla) o a través de las coordenadas obtenidas de otra fuente (mapa o medición en campo). Esta pregunta es fácilmente respondida debido al enlace entre los datos temáticos o atributos y los datos espaciales.

Ubicando áreas de interés:

Estas incluyen la pregunta: 'Donde una clase de suelo particular puede ser encontrada?'. La clase en cuestión es identificada en las tablas de atributos y el SIG es demandado para seleccionar todas las delineaciones que pertenecen a esta clase. Puede calcularse un reporte estadístico del conjunto de delineaciones, por ejemplo, área total, histograma de las áreas, etc.

6.2 Búsquedas no espaciales

Estas no requieren de un SIG, simplemente las bases de datos de atributos. Las DBMS modernas permiten búsquedas a ser formuladas con Lenguaje Estructurado

de Búsqueda (SQL) [10] y búsquedas mas visuales a través de Búsqueda Por Ejemplo (QBE).

Ejemplo de búsquedas: 'Que observaciones están correlacionadas a clases especificadas?'; 'Que observaciones tienen propiedades especificadas?'

6.3 Búsquedas mixtas

Estas requieren ambas, es decir el SIG y base de datos de atributos. Ellas utilizan el enlace entre la leyenda y base de datos de atributos. Búsquedas: 'cuales son las **propiedades del suelo** en ese sitio?"; '**Donde** un suelo con **propiedades especificadas** puede ser encontrado?'; 'Que proporción del área es ocupada por suelos con **propiedades especificadas**?'

7 CARTOGRAFIA

Conceptos clave en este capítulo:

- ❑ Uso del color para agrupar una leyenda
- ❑ Reduciendo un mapa de polígonos a escala mas pequeña: aspectos cartográficos & temáticos
- ❑ Engrandando un mapa de polígonos a una escala mas grande es raramente justificado
- ❑ Reduciendo y agrandando mapas tipo raster

Uno de los propósitos de la una SGDB es producir mapas impresos. Para este propósito, se deben seguir los principios bien establecidos sobre Cartografía en varios libros, como por ejemplo [35]. Existen algunas consideraciones especiales para los mapas de suelo, las cuales mencionaremos en esta sección.

7.1 Colores

El color es muy atractivo, pero si se lo utiliza, debe brindar un significado. Debe reflejar un **agrupamiento significativo de la leyenda del mapa**. Los colores tradicionales como púrpura para turba, azul para suelos minerales pobremente drenados, verde para suelos minerales bien drenados y amarillo para suelos excesivamente drenados, parecen psicológicamente satisfactorios, pero su uso debe ser verificado con los clientes. Un libro de Cartografía estándar como el de Robinson *et al* [35], deberá ser consultado para los aspectos psicológicos, simbólicos y prácticos del uso del color. Estos pueden variar ya sea por la cultura o por el grupo de usuarios. En este sentido el uso del color es peligroso, ya que puede llevar a mal interpretación.

El peor uso del color se da si se utilizan colores diferentes para suelos similares. Esto pasa si se utiliza un programa SIG como ArcView sin control, ya que este programa puede asignar colores contrarios automáticamente sin considerar el aspecto temático de las categorías de la leyenda.

Principios cartográficos a copiar: mas de seis a diez matices llevan a la confusión; los colores oscuros cubren elementos topográficos de referencia.

Algunas organizaciones de levantamiento de suelos, como en USA, no utilizan el color; por lo que el mapa es simplemente un portador de información. El espacio es dividido por líneas que representan polígonos y dentro por símbolos. No existe un sesgo visual y el cliente no hace inferencias no garantizadas.

7.2 Mapas de polígonos

7.2.1 Reduciendo un mapa de polígonos a una escala mas pequeña

El SIG permite que un mapa sea impreso a cualquier escala. Aquí consideramos el caso donde un mapa es impreso a una escala mas pequeña que su fuente.

El resultado cartográfico de una reducción **mecánica** en el tamaño del mapa (por ejemplo, una disminución de la escala) se realiza a cada delineación mas pequeña, de acuerdo al cuadrado del radio de las escalas. El Área Mínima Legible es incrementada correspondientemente, es decir, proporcionalmente a la reducción en área de la escala. Por conveniencia, definimos la **proporción de reducción (RR)** como la proporción de los números lineales de la escala:

$$\text{Proporción de Reducción} = SN_{\text{nuevo}} / SN_{\text{original}}$$

Por ejemplo, si un mapa es originalmente compilado a una escala de 1:50000 y después reducido a 1:100000, la escala lineal es reducida por 2x, y $RR = 100000 / 50000 = 2$. Por tanto, el área es reducida por $2^2 = 4x$. La MLA se incrementa de 10 a 400ha.

Esto presenta **dos problemas cartográficos**:

1. **Algunas delineaciones se vuelven ilegibles**, es decir, aquellas donde la MLA del mapa a escala mas grande es ilegible en una mapa a escala mas pequeña. En el ejemplo anterior, cualquier delineación entre 10 a 40ha (legible a escala 1:50000) ahora es ilegible a la escala reducida de 1:100000.
2. **El Índice de Máxima Reducción (IMR) es mas pequeño**, y puede indicar ilegibilidad completa del mapa, aun si las delineaciones individuales son lo suficientemente grandes. Un $IMR=2$ es considerado optimo; de esa manera al menos que el IMR original fue $>2x(RR)$, el IMR será <2 después de la reducción.

En el caso de los mapas de suelo, **no existe una solución puramente cartográfica**. Debemos por supuesto eliminar mecánicamente los polígonos ilegibles y asignar su área al polígono adyacente. En el caso de 'islas', estas deben ser absorbidas por los polígonos a su alrededor. Peor cual es el caso de una polígono pequeño que limita con varios polígonos grandes? O un grupo de polígonos pequeños que juntos serán $>MLD$ en la nueva escala? El **patrón del paisaje** debe ser analizado en base a la nueva escala pequeña.

Incluso en el caso de las 'islas', el polígono grande remanente tiene una composición diferente, es decir, diferente proporción de suelos. Las unidades de mapeo remanentes deberán ser re-examinadas, re-descritas y posiblemente renombradas en razón de su nueva composición. Para las reglas de nomenclatura de las unidades de mapeo, se le sugiere consultar el texto escrito por Rossiter y adaptado al español por Vargas [36]. Una situación común es aquella donde varias consociaciones ahora descritas como asociaciones con patrones del paisaje conocidos de sus componentes.

Note que el SIG puede realizar una generalización mecánica, por ejemplo por eliminación de polígonos que son muy pequeños y sumándolos a sus vecinos mas

grandes. Pero esto es puramente cartográfico y debemos considerar las implicaciones categóricas.

Por ejemplo, piense acerca de una planicie glacial con dos componentes: suelos gravosos francos, profundos, bien drenados en las posiciones mas altas y suelos de textura fina, pobremente drenados y ricos en materia orgánica en los 'bazines' de las depresiones. Estos pueden ser fácilmente delineados en una fotografía aérea. Suponiendo que los bazines ocupan aproximadamente 1 ha cada uno, ellos pueden ser legiblemente delineados a una escala de 1:16000 o mayor, por ejemplo 1:12500 (MLA=0.625ha). Tenemos un mapa que luce como un queso Suizo donde los hoyos se muestran claramente. Suponga que los bazines ocupan 20% del área total y que los suelos gravosos francos el restante 80%. Existen dos unidades de mapeo, amabas consociaciones.

Ahora suponga que reducimos la escala de 1:12500 a 1:25000 (RR=2). La MLA es $0.625 \times 4 = 2.5$ ha, la cual es mas grande que los bazines. Estos se vuelven ilegibles y deben ser eliminados. Su área ahora es incluida a los polígonos vecinos.

Si omitimos a los bazines del mapa, de pronto ya no tenemos el queso Suizo, solo tenemos una gran unidad de mapeo que consiste del 80% de los suelos gravosos francos y el 20% de los bazines. ¡Por lo que **debemos** cambiar la leyenda!. Como los bazines son fuertemente contrastantes y limitantes, aun si representan solo el 20%, deben ser incluidos en el nombre de la unidad de mapeo; ya que estos dos componentes del paisaje pueden obviamente ser mapeados separadamente a una escala grande (es decir, la escala original), la nueva unidad de mapeo será una asociación. El mapa a escala mas pequeña es aun categóricamente detallado, pero cartográficamente general.

7.2.2 Agrandando un mapa de polígonos a escala mas grande

Aquí consideramos el caso donde un mapa es impreso a una escala mas grande su original. Como no podemos nunca adicionar información, el mapa a escala mas gran es de hecho **falso**, ya que la MLD a escala mas grande no fue de hecho mapeada. No podemos asumir que no existen áreas mas grandes que la MLA que contengan suelos diferentes. Así mismo, las líneas limite entre polígonos lucen refinadas; estas pueden de hecho ser mas detalladas a una escala mas grande, pero no fueron mapeadas. Es muy raramente justificado imprimir un mapa a una escala mas grande que su fuente original.

A una escala mas grande, las entidades lineales y puntuales que representan cuerpos de suelo deben ser representados como polígonos, asumiendo que el ancho de la línea o radio del punto fue controlado por la escala original del mapa.

7.3 Mapas tipo Grilla

La reducción y el aumento de una mapa de polígonos, corresponde al decremento e incremento de la resolución de un mapa tipo raster.

7.3.1 Reduciendo la resolución de un mapa tipo grilla

Será necesario usualmente disminuir la resolución, es decir, incrementar el tamaño de la celda o píxel de un mapa raster, de manera de corresponder otro mapa raster generado a una resolución mas gruesa. Existen dos métodos generales: **filtrado** (filtering) y **re-muestreo** (resampling), y un método que se aplica solamente a mapas de valores continuos, **promediando** (averaging).

Filtrado (filtering):

Un **filtro majority**, asigna el valor mayoritario del grupo a la nueva celda o píxel. Se utiliza un regla de prioridad para romper enlaces. Los valores que ocurren como píxeles aislados no serán representados en el mapa mas general.

Re-muestreo (resampling):

El valor de la **celda o píxel central** del grupo se aplica a la nueva celda.

Promediando (averaging):

Los valores de las celdas en el grupo son promediados y su valor es entonces aplicado a nueva celda. Esto tiene sentido para variables continuas donde el valor promedio tiene significado, por ejemplo, el contenido de sal.

8 METADATOS

Conceptos clave en este capítulo

- ❑ Sin Metadatos, una SGDB es casi inservible
 - ❑ Estándares útiles y herramientas de Metadatos se encuentran disponibles gratuitamente.
 - ❑ Metadatos se trata del procedimiento de documentación esencialmente cuidadoso.
-

Los **Metadatos** son 'datos acerca de los datos'. Ellos describen el juego de datos a todos los usuarios. Incluso una simple descripción puede ser considerada Metadatos, pero hoy en día el termino es reservado a descripciones detalladas y formales.

Metadatos estándares han sido desarrollados por la Comisión Federal de Datos geográficos (FGDC) de USA. Este contiene las secciones principales:

1. **Identificación_Información:** identifica el juego de datos y da sus limites geográficos.
2. **Información de la_Calidad de_Datos:** ¿cuan confiable son los datos? Esto explica como los datos fueron recolectados, los diseños de muestreo, las técnicas analíticas, etc. Para mapas interpolados, se debe especificar el método de interpolación.
3. **Información_Organización_Datos_Espaciales:** explica cual fue el modelo espacial utilizado para representar los datos.
4. **Información_Referencia_Espacial:** explica respecto al sistema de coordenadas utilizad para la Georeferenciacion.
5. **Información_Entidad_Atributos:** explica los atributos (variables) en la base de datos, por ejemplo, el significado de los códigos y la estructura de las tablas de atributos.
6. **Distribución_Información:** explica el como obtener los datos, incluyendo el acceso en línea y las restricciones en el uso de los datos.
7. **Información_Referencia_Metadatos:** explica sobre quien es el responsable de los metadatos y el estándar a seguir.

8.1 Fuentes de Metadatos

Referencia principal: Federal Geographic Data Committee. 1994. Content standards for digital spatial metadata (June 8, 1994 version). Federal Geographic Data Committee. Washington, D.C.

Disponible en formato HTML de la FGDC en URL: <http://www.fgdc.gov/metadata/constan.html>. Esta pagina también permite descargar el estándar en formato PDF. Su pagina principal es <http://www.fgdc.gov>.

También se encuentra disponible en el sitio de USGS: <http://geology.usgs.gov/tools/metadata/standard/metadata.html>, junto con mucho mas información referida a metadatos de USGS en el URL <http://geology.usgs.gov/tools/metadata/>

Un sitio muy util para todo lo referido a metados es <http://www.blm.gov/gis/nsdi.html>, mantenido por Sol Katz del Bureau of Land Mangement (BLM). La creación de Metadatos puede ser facilitada por varias herramientas: una pagina que revisa esto es <http://badger.state.wi.us/agencies/wlib/sco/metatool/mtools.htm>

8.2 Metadatos de suelos

El Subcomité de Datos de Suelos (**Soil Data Subcommittee**) tiene su pagina en <http://www.stalab.iastate.edu/soils/fgdc-sds/>.

El mapa de suelos de México a escala 1:1000000 tiene su metadatos en <http://www.cep.unep.org/data/north/soils/mexsoils.html>

9 EL USO DE PROGRAMAS DE BASE DE DATOS DE SUELOS EXISTENTES

Hasta esta sección nos hemos referido al uso de una base de datos geográfica personalizada, es decir que el usuario la diseña de acuerdo a los objetivos y características de su proyecto de levantamiento de suelos. Sin embargo, si el usuario desea utilizar una base de datos existente y que sea estándar, este puede utilizar los programas existentes para dicho fin. En la actualidad existen dos programas que han sido desarrollados por las dos agencias oficiales que rigen el levantamiento de suelos, una a nivel mundial como lo es la FAO a través de su división AGL (Fomento de Tierras y Aguas) y la otra mas a nivel nacional pero también internacional como lo es la USDA. Ambos programas están basados en sus guías respectivamente, una para la Descripción de Perfiles [16] y la otra Manual para el Levantamiento de Suelos y Manual para la descripción muestreo de suelos (Soil survey manual) [37, 39].

9.1 Base de Datos Multilingüe de Perfiles de Suelos (SDBmPlus 2.01 [15])

Para la explicación concreta de este sistema, nos basaremos en el trabajo de investigación realizado por Navia y Vargas [29]. SDBmPlus es un programa informático con entorno Windows, de fácil manejo para homogeneizar, almacenar y utilizar grandes cantidades de datos geo-referenciados de suelos, procedentes de un levantamiento de suelos a cualquier escala, sea regional, nacional o local.

Como toda base de datos esta cumple las funciones generales de almacenamiento, manejo, y recuperación de datos, pero específicamente, este sistema se caracteriza por:

- (1) como su nombre lo dice, es multilingüe ya que el usuario puede personalizar a los cuatro idiomas siguientes: español, Ingles, Francés y Alemán;
- (2) permite una caracterización y entrada de datos detallada ya que esta basada en la Guía de Descripción de Suelos de la FAO [16], por lo que esta sigue su estructura;
- (3) al ser un programa abierto, las modificaciones a los datos ya existentes es posible, por lo que permite el monitoreo temporal de las diferentes propiedades edafológicas;
- (4) tiene incorporado un bloque específico para los Metadatos, donde el usuario puede especificar los diferentes métodos de laboratorio utilizados en el análisis;
- (5) una vez que los datos han sido ingresados, al programa brinda la opción de mostrar representaciones de la variabilidad dentro el perfil del suelo de ciertas propiedades edafológicas;

- (6) presenta la opción de reporte técnico de suelos con la opción de imprimir estos resultados;
- (7) el usuario puede derivar algunas variables a través de las funciones de pedotransferencia edafológica PTF.
- (8) posee una interfaz de exportación a un formato universal de base de datos, haciendo que se creen enlaces a los sistemas de información geográfica SIG, resultando en una base de datos geográfica.

La base de datos **SDBm Plus** puede almacenar los siguientes bloques de datos:

VARIABLES BÁSICAS		
Bloque 1	Información general	Características del lugar de ubicación del perfil, así como la información relacionada con su identificación y clasificación.
Bloque 2	Descripción de horizontes	Características morfológicas del suelo que se describen horizonte por horizonte.
Bloque 3	Análisis generales	Resultados de los análisis de laboratorio estándar en los estudios de reconocimiento de suelos.
Bloque 4	Sales solubles/ Metales pesados	Resultados analíticos sobre las sales solubles más frecuentes en el suelo, y de interés desde una perspectiva agrícola, así como sobre los oligoelementos y otros elementos relacionados con la contaminación del suelo.
Bloque 5	Datos físicos	Determinaciones físicas del suelo, de campo y de laboratorio, sobre atributos estándar en reconocimientos y evaluación de suelos.
Bloque 6	Retención de Agua / Conductividad hidráulica	Determinaciones sobre propiedades hídricas del suelo que son de frecuente uso en los modelos mecánicos de simulación.
Bloque 7	Variables analíticas adicionales	Hasta un total de 10 propiedades especiales de caracterización del suelo, como puede ser la cohesión, ángulo de fricción interna, estrés de pre-consolidación, proporción de huecos, etc.
Bloque 8	Fotografías	Información digitalizada sobre imágenes del lugar, el perfil vertical y otros aspectos de interés.
Bloque 9	Metadatos	Información sobre los procedimientos y métodos empleados en la obtención de los datos de análisis de laboratorio

VARIABLES DERIVADAS		
Bloque 10	Variables derivadas	Información obtenida mediante funciones de transferencia edafológica (PedoTransfer).

A continuación, presentamos algunas figuras en base al estudio de Navia y Vargas [29] que nos muestran las diferentes funciones que SDBmPlus posee:



Figura 1: Ventana principal del SDBmPlus mostrando los perfiles del Municipio de Roboré.

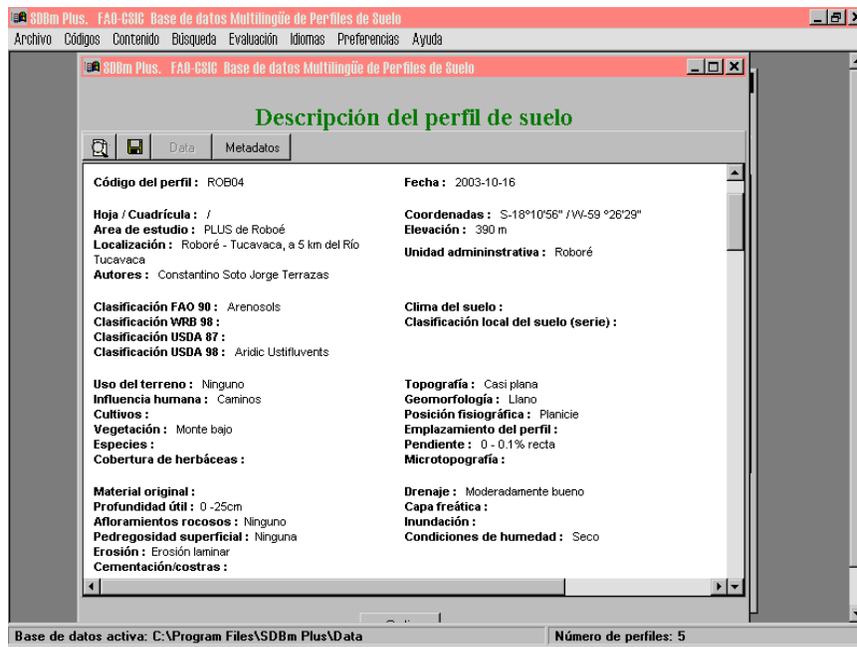


Figura 2: Ventana mostrando los datos del sitio donde se encuentra el perfil seleccionado

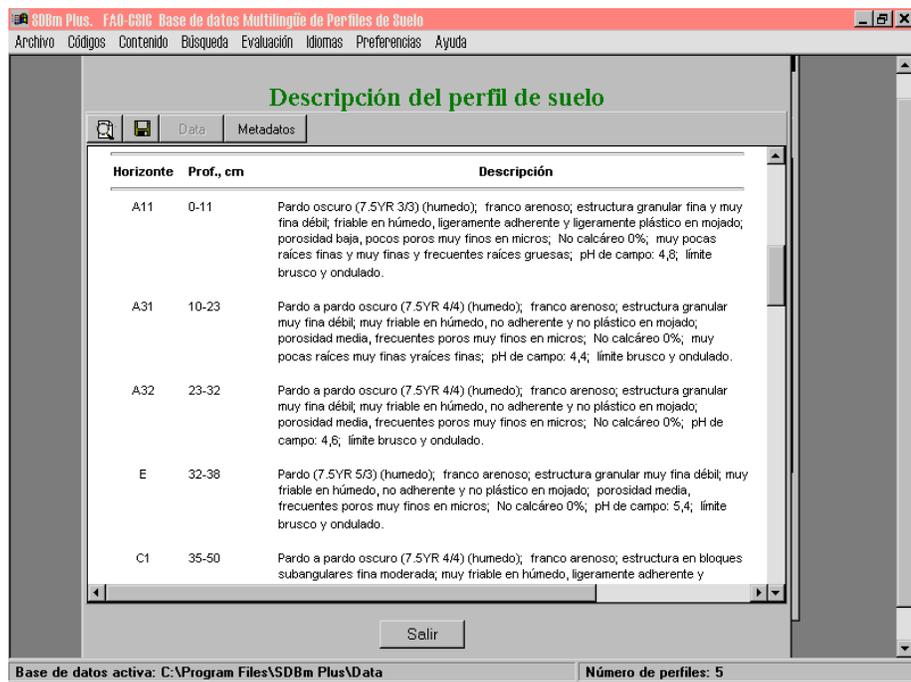


Figura 3: Ventana mostrando la descripción de horizontes del perfil seleccionado

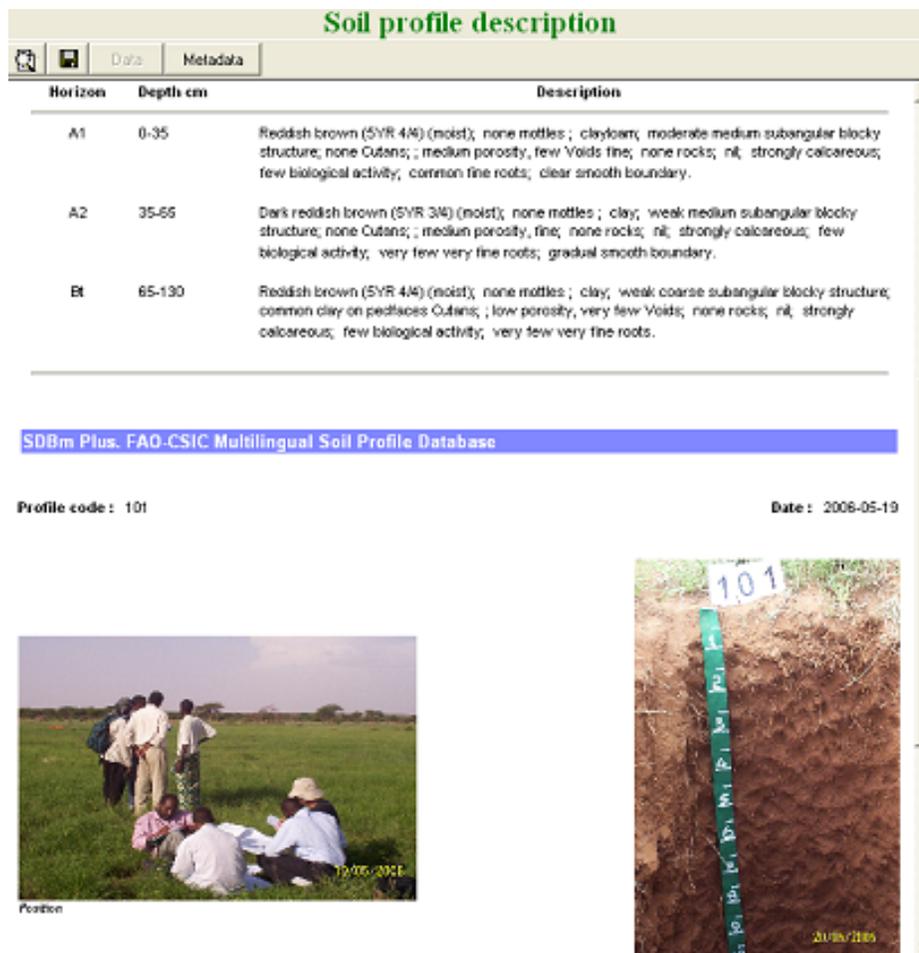


Figura 4: Ventana mostrando la descripción de horizontes, la foto del perfil y el sitio seleccionado

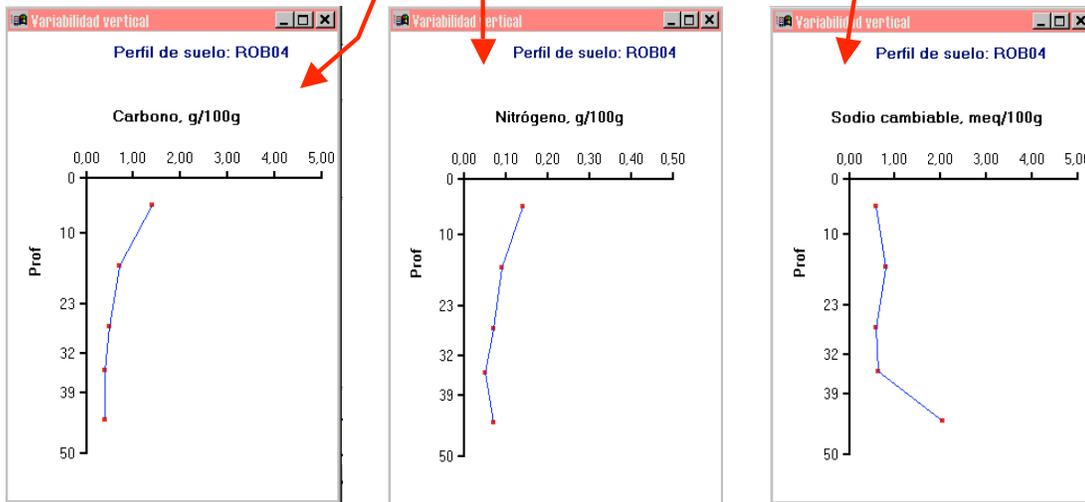
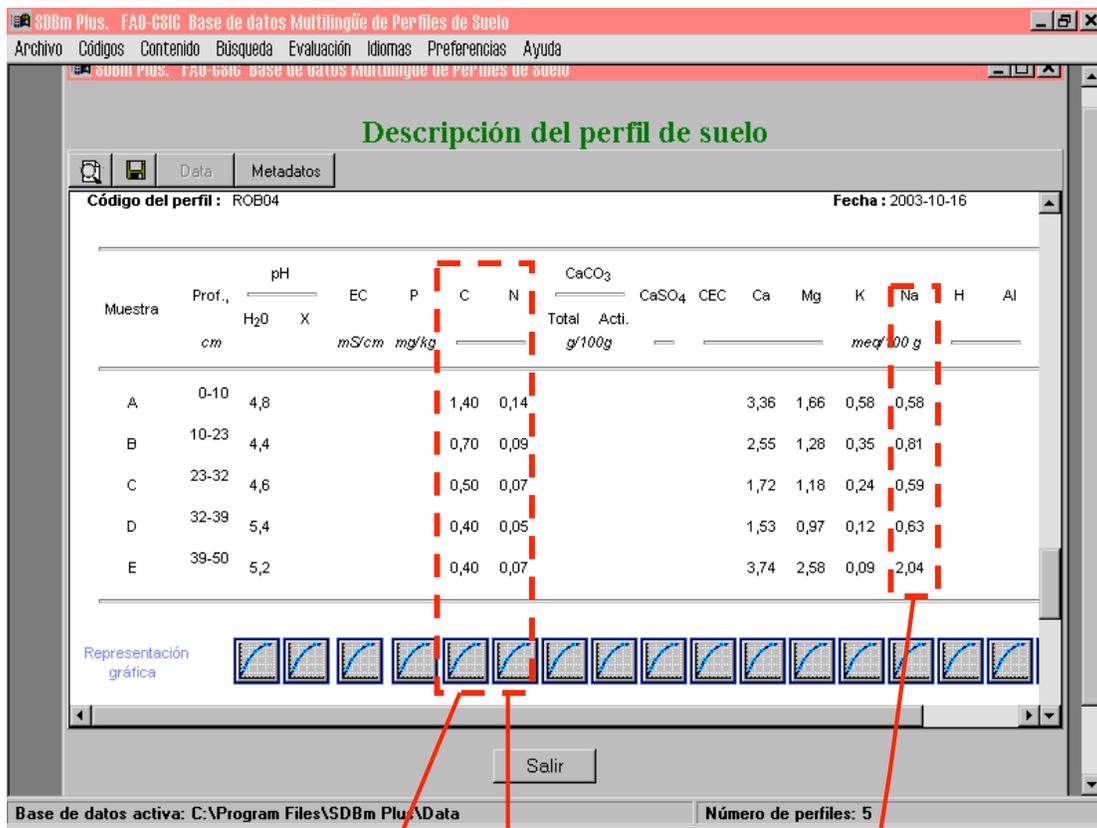


Figura 5: En base a los datos de laboratorio, el programa puede generar graficas de variación a lo largo del perfil

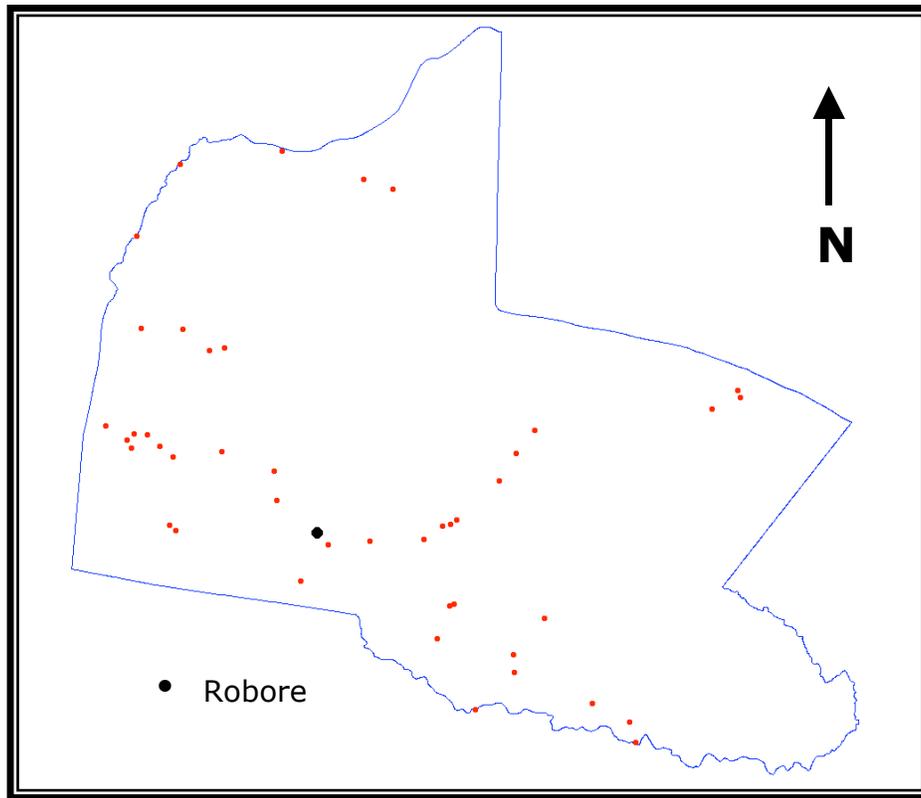


Figura 5: Perfiles de Suelo o calicatas distribuidas a lo largo del Municipio de Robore

PRNO	HRNO	DESI	UPBO	LOBO	HUE1	HUE2	VAL1	VAL2	CHR1	CHR2	MOD1
101	1	A1	0	35	5YR	W	4	W	4	W	M
101	2	A2	35	65	5YR	W	3	W	4	W	M
101	3	Bt	65	130	5YR	W	4	W	4	W	M

Figura 6: Ejemplo de la base de datos dbf. obtenida de la interfase de evaluación, que consiste en exportar la base de datos de los bloques y variables seleccionadas para enlazarla al SIG.

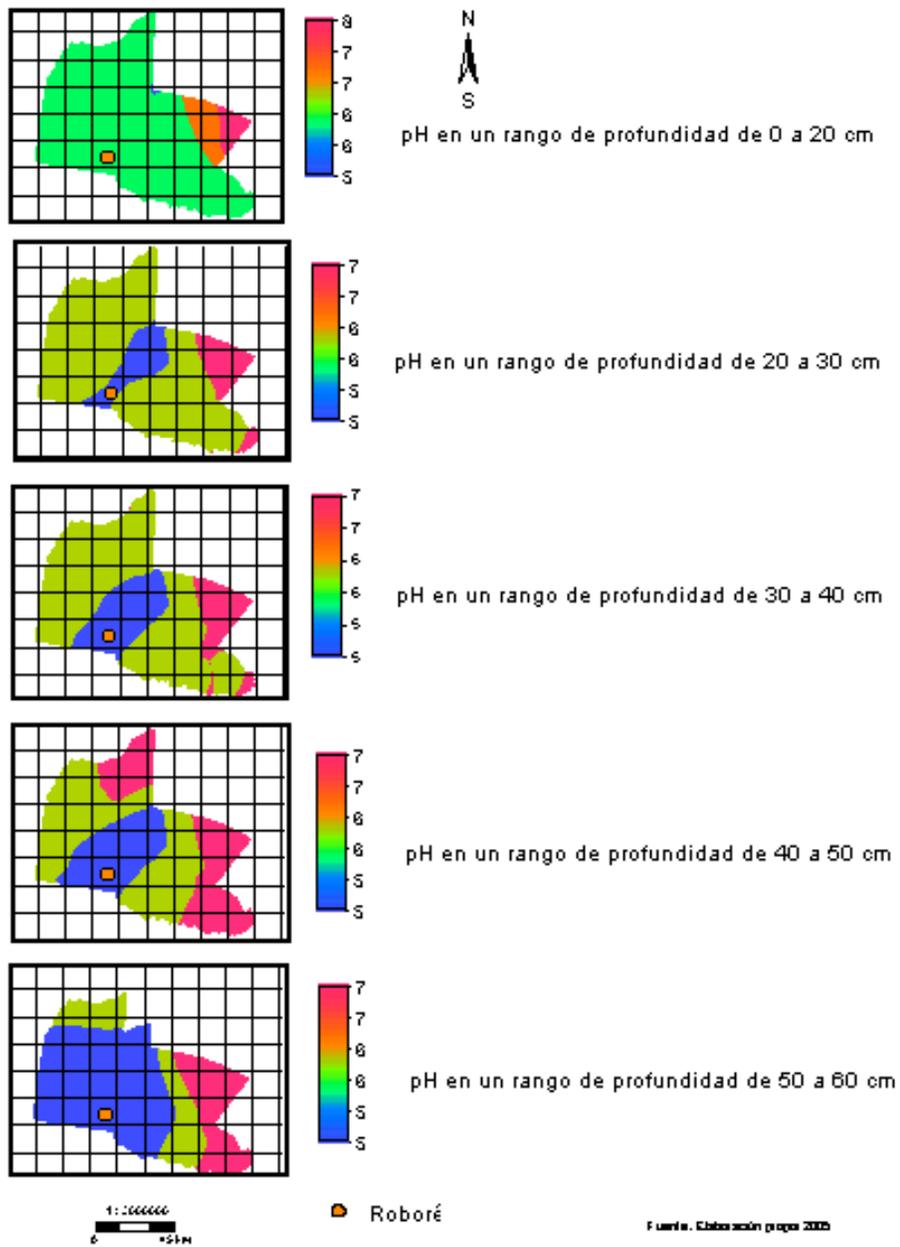


Figura 7: Mapas de pH a diferentes profundidades, generados a partir del enlace de la base de datos con el SIG del Municipio de Roboré

9.2 WinPedon (1.1.2) [42]

Windows PEDON es un programa de base de datos en plataforma Windows creado por la USDA para actualizar y enriquecer la Base de Datos del National Soil Information System (NASIS) de los Estados Unidos. Almacena descripciones del pedon, notas de campo, humedad del suelo, medidas de temperatura, y datos de transectos. con una ubicación geográfica específica. Maneja y provee datos del sitio, del pedon, asociación de objetos y sitios de los datos introducidos. Despliega estos objetos (datos) en ventanas separadas.

Windows PEDON usa en su esquema tres conceptos, mas que módulos donde se almacena los datos (forma de entrada de datos) que están basados en el manual de levantamiento de suelos (Soil Survey Manual) [39], estos son:

- **SITIO:** Es un sitio punto particular sobre la superficie de la tierra. Tiene una ubicación geográfica y muchas veces va mas allá de las dimensiones de un pedon. Considera datos con atributos temporal, como un inventario de recursos naturales (bosques, suelo, rendimientos agrícolas, etc.).
- **PEDON:** Se denomina pedon al cuerpo más pequeño de un tipo de suelo lo suficientemente grande como para representar la naturaleza, distribución y variabilidad de horizontes preservadas en muestras de suelo. Se extiende al límite mas bajo de un suelo. La superficie de un pedon es poligonal y varía desde 1 m a 10 m² dependiendo de la naturaleza y variabilidad en el suelo.
- **TRANSECTO:** Es una serie de transectos (en este caso, pedones) a lo largo de un paisaje con el fin de coleccionar datos de suelo con un propósito dado. Un transecto esta compuesto típicamente por múltiples pedones.
- **ASOCIACIÓN DE SITIO:** Es una agrupación de sitios, que facilita la localización de un grupo de sitios almacenados en la BD recientemente.

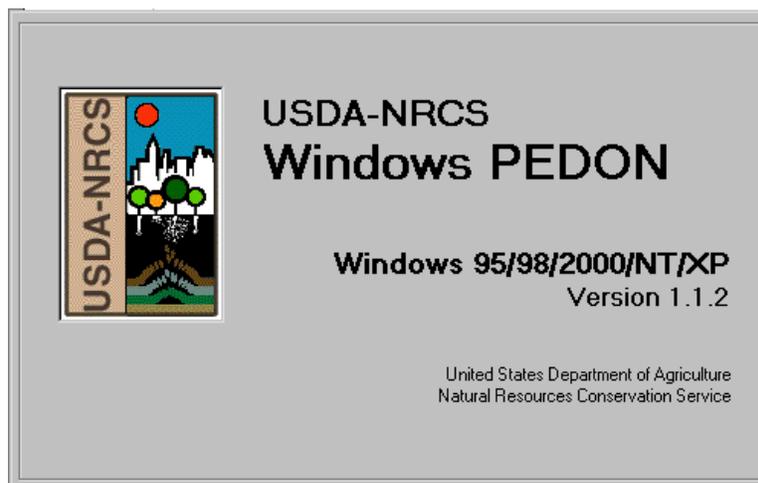


Figura 8: Pantalla de inicio del *Windows PEDON*

La base de datos Windows Pedon es una base de datos basada en Microsoft Access. Como se menciona anteriormente su propósito es apoyar el almacenamiento de datos a la NASIS, por tanto su objetivo inicial es específico, sin embargo, esta puede ser usada del mismo modo, si el usuario ha generado datos bajo el esquema USDA de levantamiento de suelos, de lo contrario esta base de datos no le servirá ya que esta contempla todos los campos que deben ser llenados en la misma, sin embargo, existe la posibilidad de dejar algunos campos vacíos, pero se debe cumplir esa condición.

Es una base de datos geográfica ya que posee un campo en la descripción del sitio donde se realizó la descripción del perfil, este campo se utiliza para ingresar las coordenadas expresadas en el sistema métrico UTM. Así mismo, al estar diseñada en Microsoft Access, su compatibilidad con los diferentes programas Sistemas de Información Geográfica es muy amplia.

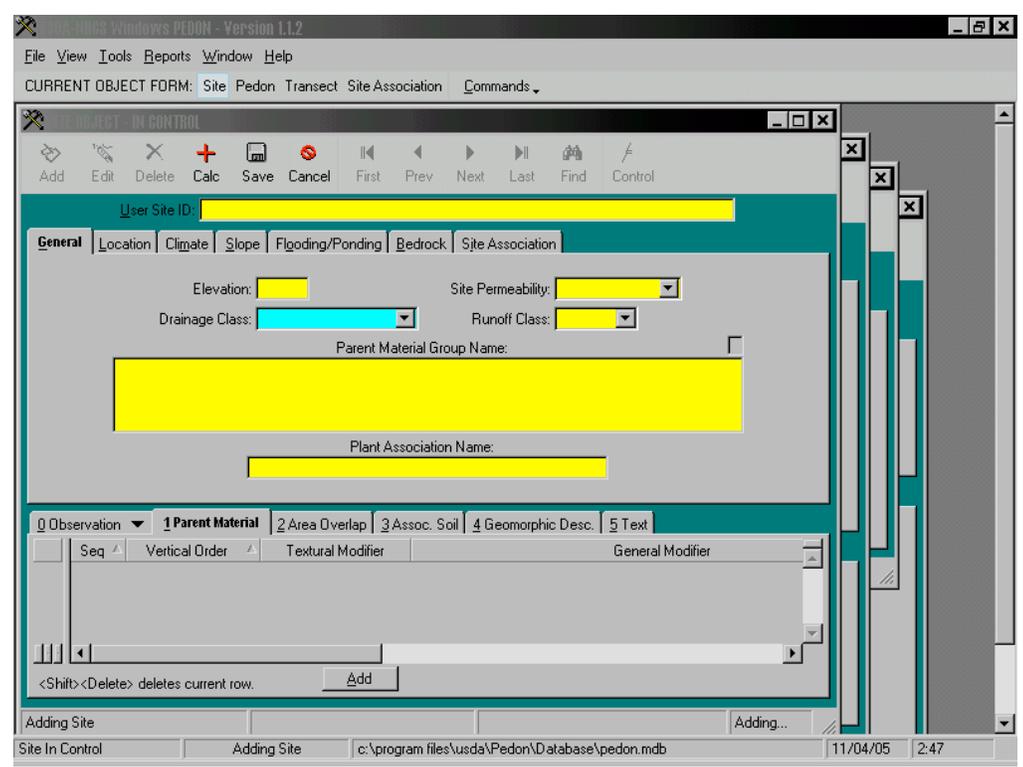


Figura 9 Ventana principal donde se inicia a introducir los datos en *Windows PEDON*

Este sistema es mas complejo que el programa SDBmPlus, además de ser específico en cuanto la audiencia para la que fue diseñado.

Hasta aquí, hemos brindado una idea general de cómo crear una Base de Datos Geográfica de Suelos Personalizada y lo contrario, el uso de Programas específicos que siguen las dos instituciones mas importantes en cuanto al recurso suelo se trata, FAO y USDA.

10 ABREVIACIONES

Las siguientes abreviaciones se encuentran en el texto en su idioma original, es decir inglés, sin embargo a continuación presentamos su traducción al español.

CMSV	Modelo Continuo de Variabilidad Espacial
DBMS	Sistema de Manejo de Bases de Datos
DEM	Modelo Digital de Elevación
DMSV	Modelo Discreto de Variabilidad Espacial
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación
FGDC	Comisión Federal de Datos Geográficos (USA)
GCP	Puntos de Control de Terreno
GIS-SIG	Sistemas de Información Geográfica
GPS	Sistema de Posicionamiento Global
IMR	Índice de Máxima Reducción
IPE	Error de Posición Inherente
MLA	Área Mínima Legible; Máxima Exactitud de Ubicación
MLD	Delineación Mínima Legible
MMSV	Modelo Mixto de Variabilidad Espacial
PAT	Tabla de Atributos del Polígono
QBE	Búsqueda Por Ejemplo
RR	Radio de Reducción
SGDB	Base de Datos Geográfica de Suelos
SN	Numero de Escala (la inversa del radio de escala de un mapa)
SQL	Lenguaje Estructurado de Búsqueda
SSURGO	Base de Datos Geográfica del Levantamiento de Suelos (USA)
URL	Buscador Universal de Recursos (Internet)

11 BIBLIOGRAFIA

1. Baize, D., *Soil science analyses: a guide to current use* 1993, Chichester: John Wiley & Sons. 192.
2. Beckett, P.H.T. and P.A. Burrough, *The relation between cost & utility in soil survey. IV. Comparisson of the utilities of soil maps produced by different survey procedures, and to different scales.* Journal of Soil Science, 1971. **22**(4): p. 466-480.
3. Breeuwsma, A. and H.d. Bakker, *Bodemvorming*, in *Bodemkunde van Nederland*, H.d. Bakker and W.P. Locher, Editor. 1990, Malmberg: Den Bosch. p. 57-70.
4. Buol, S.W., F.D. Hole, and R.J. McCracken, *Soil genesis and classification*, ed. 3rd 1989, Ames, IA: The Iowa State University Press, xiv. 446.
5. Burrough, P.A., *Soil Information systems*, in *Geographical information systems*, M.F.Goodchild D.J.Maguire, and D.W. Rhind, Editor. 1991, Longmans: Harlow, England. p. 153-169.
6. Burrough, P.A., *Fractals and geostatistical methods in landscape studies*, in *Fractals in Geography*, N.S.N. Lam and L. De Cola, Editor. 1993, Prentice-Hall.
7. Burrough, P.A., *Soil variablitiy: a late 20th century view.* Soils and Fertilizers, 1993. **56**(5): p. 529-562.
8. Burrough, P.A. and R.A. McDonnel, *Principles of geographical information systems* 1998, Oxford: Oxford University Press 333.
9. D.G.Rossiter, Hengl, T., *Creación de Fotointerpretaciones geoméricamente corregidas, ortofotos, fotomosaicos y mapas base para un proyecto SIG. Traducción al español por Vargas, R, R.* 2002, ITC: Enschede, The Netherlands.
10. Date, C.J., *An introduction to data base systems.* 5th ed 1990, Reading, MA: Addison-Wesley.
11. Davis, J.C., *Statistics and data analysis in geology* 1986, New York: Wiley, x. 646.
12. Davis, R.E., et al, *Surveying: Theory and Practice.* 6th ed 1981, New York: McGraw-Hill, xv. 992.
13. de Gruijter, J.J., D.J.J. Walvoort, and P.F.M. van Gaans, *Continuous soil maps - a fuzzy set approach to bridge the gap between aggregation levels of process and distribution models.* Geoderma, 1997. **77**: p. 169-195.
14. Deutsch, C.V. and A.G. Journel, *GSLIB: Geostatistical software and user's guide* 1992, Oxford: Oxford University Press, x. 340.
15. FAO-CSIC, *Base de Datos Multilingue de perfiles de Suelos (SDBmPlus).* 2002: Sevilla, Espana-Roma, Italia.
16. FAO-ISRIC, *Guia para la descripcion de Perfiles.* 3ra ed 1990, Roma, Italia.
17. FAO.World reference base for soil resources. World Soil Resources Report 84.1998.84.Rome.Food and Agriculture Organization of the United Nations.88.
18. Forbes, T.R., D. Rossiter, and A. Van Wambeke.Guidelines for evaluating the adequacy of soil resource inventories.1987.printing ed. SMSS Technical Monograph.4.Ithaca, NY.Cornell University Department of Agronomy.51.
19. Heuvelink, G.B.M., *Error propagation in quantitative spatial modelling: applications in Geographical Information Systems.* Netherlands Geographical Studies, 1993. **163**(Utrecht: Facultier Ruimtelijke Wtenschappen Universiteit Utrecht): p. 151.
20. Holst, A.F.v. , *Bodemkartering en bodemkaarten*, in *Bodemkunde van Nederland*, H.d. Bakker and W.P. Locher, Editor. 1990, Malmberg: Den Bosch. p. 85-99.
21. Howe, D.R., *Data analysis for data base design.* 2nd ed 1989, London: Edward Arnold 317.

22. Isaaks, E.H. and R.M. Srivastava, *An introduction to applied geostatistics* 1989, Oxford: Oxford University Press 561.
23. Jenny, H., *Factors of soil formation - a system of quantitative pedology* 1941, New York: McGraw-Hill 281.
24. Jenny, H., *Derivation of state factor equations of soils and ecosystems*. Soil Science Society of America Proceedings, 1961. **25**: p. 385-388.
25. Jenny, H., *The soil resource: origin and behavior*. Ecological Studies 37 1980, New York: Springer-Verlag, xx. 377.
26. Lauren, J.G., et al, *Variability of saturated hydraulic conductivity in a Glosaquic Hapludalf with macropores*. Soil Science 1987. **145**: p. 20-28.
27. Leung, Y., *On the imprecision of boundaries*. Geographical Analysis, 1987. **19**(2): p. 125-151.
28. Mark, D.M. and F. Csillag, *The nature of boundaries on "area-class" maps*. Cartografica, 1989. **26**(1): p. 65-78.
29. Navia, P.M., Vargas, R. R., *Sistematización de datos generados en un levantamiento de suelos convencional. Situación actual y dos escenarios. Caso Municipio de Robore-Bolivia.*, in Centro CLAS. 2005, Universidad Mayor de San Simón: Cochabamba, Bolivia. p. 47.
30. Nofziger, D.L., J.S. Chen, and A.G. Hornsby, *Uncertainty in pesticide leaching risk due to soil variability*, in *Data reliability and risk assessment: applicability to soil interpretations*, W.D. Nettleton, Editor. 1996, American Society of Agronomy: Madison, WI. p. 99-130.
31. Oliver, M.A. and R. Webster, *How geostatistics can help you*. Soil Use & Management, 1991. **7**(4): p. 206-217.
32. Pebesma, E.J., *Gstat: Geostatistical modelling, prediction and simulation: User Manual Version 1.5* 1995, Utrecht: Dept. of Physical Geography, University of Utrecht 24.
33. Phillips, J.D., *Chaotic evolution of some coastal plain soils*. Physical Geography, 1993. **14**(6): p. 566-580.
34. Photogrammetry, American Society of, *Manual of photogrammetry*. 4th ed 1980, Falls Church, VA:ASP&RS 1056.
35. Robinson, A.H., et al, *Elements of cartography*. 6th ed 1995, New York: John Wiley 674.
36. Rossiter, D.G., *Metodologías para el levantamiento del recurso suelo. Traducido al español por Ronald Vargas*. 2002, ITC: Enschede, The Netherlands. Cochabamba, Bolivia.
37. Schoeneberger, P.J., Wysocki, D.A., Benham, E.C., and Broderson, W.D., *Field book for describing and sampling soils, Version 2.0*, ed. National Soil Survey Center Natural Resources Conservation Service 2002, Lincoln, NE.
38. Soil, Survey, Staff. Soil survey laboratory manual. 1996. 42. Washington: U.S. Government Printing Office USDA-SCS National Soil Survey Center.
39. Soil Survey Division Staff, *Soil survey manual*. United States Department of Agriculture Handbook N18 1993, Washington, DC: US Department of Agriculture, xix. 437.
40. Soil Survey Staff, *Keys to Soil Taxonomy*. 8th ed 1998, Washington, DC: US Government Printing Office.
41. Taylor, D.R.F., *Geographical information systems and developing nations*, in *Geographical information systems: principles and applications*, M.F. Goodchild D.J. Maguire, and D.W. Rhind, Editor. 1991, Longman Scientific and Technical: New York. p. 71-84.

42. USDA-NRCS, *Windows Pedon*. 2002: Lincoln, USA.
43. Vieira, S.R., et al, *Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties*. Hilgardia, 1982. **51**: p. 1-75.
44. Vink, A.P.A, *Land use in advancing agriculture 1975*, New York: Springer-Verlag, x. 394.
45. Webster, R. and M.A. Oliver, *Statistical methods in soil and land resource survey 1990*, Oxford: Oxford University Press.
46. Wilding, L.P. and L.R. Drees, *Spatial variability and pedology*, in *Pedogenesis and soil taxonomy. I Concepts and interactions*, N.E. Smeck L.P. Wilding, and G.F. Hall, Editor. 1983, Elsevier: Wageningen. p. 83-116.
47. Zinck, J.A. and C.R. Valenzuela, *Soi geographic database: structure & application examples*. ITC Journal, 1990. **1990**(3): p. 270-294.