

Tema 10

Cartografía Digital de Suelos



MINISTERIO
DE AGRICULTURA
Y GANADERÍA



PROGRAMA
**RESILIENCIA
CLIMATICA**
BOSQUES CAFETALEROS

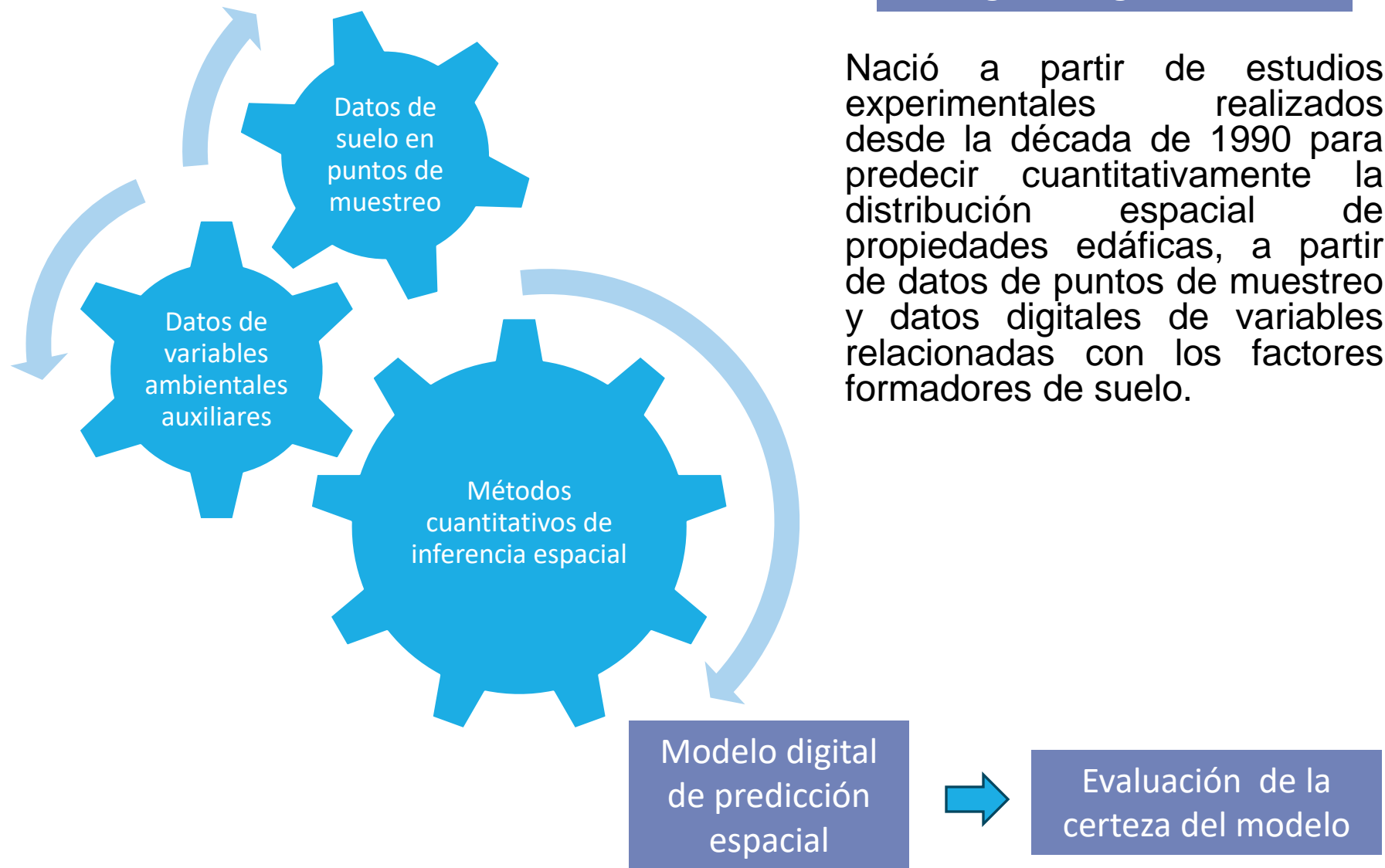


Banco Interamericano
de Desarrollo

Dr. Jesús A. Vilorio R.
Universidad Central de Venezuela
Facultad de Agronomía
Postgrado en Ciencia del Suelo

Cartografía Digital del Suelo

Nació a partir de estudios experimentales realizados desde la década de 1990 para predecir cuantitativamente la distribución espacial de propiedades edáficas, a partir de datos de puntos de muestreo y datos digitales de variables relacionadas con los factores formadores de suelo.



Modelo Básico de la Cartografía de Suelos

- La cartografía digital del suelo, al igual que los métodos tradicionales de mapeo de suelos, se fundamenta en el modelo de relaciones entre los atributos del suelo y los factores formadores.
- Pero el mapeo tradicional utiliza modelos mentales cualitativos que dependen de experiencias previas y no son comprobados estadísticamente.
- En cambio, la cartografía digital tiende a producir modelos cuantitativos, a partir de modelos digitales de elevación, imágenes satelitales y otras fuentes de datos.

Modelo SCORPAN (McBratney et al., 2003)

$$\bullet S = f(s, c, o, r, p, a, n)$$

S= atributo del suelo a ser predicho

s= información previa sobre el suelo (perfiles, mapas, conocimiento experto)

c= clima

o= organismos

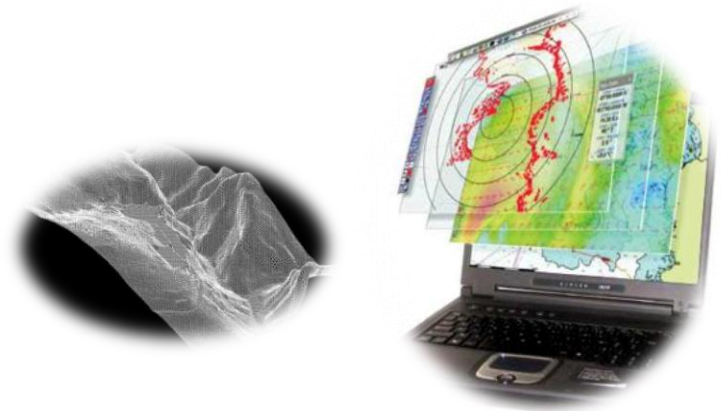
r= relieve

p= material parental

a= edad (age)

n= localización x, y

El modelo SCORPAN destaca el uso de información de puntos de muestreo de suelos y la necesidad de georreferenciar todos los datos.



Datos de Suelos

Incluyen datos heredados de perfiles, mapas y diagnósticos de fertilidad de suelos, así como datos aportados por nuevos muestreos.

Problemas relacionados con los datos de perfiles de suelo heredados:

1. El acceso a los datos es difícil si estos se encuentran dispersos y no han sido organizados en sistemas de información.
2. Algunas instituciones imponen restricciones al uso de los datos.
3. Puede haber inconsistencias en los métodos de medición de las propiedades del suelo entre datos que proceden de fuentes diferentes.

Datos de Suelos

4. La georreferenciación de los sitios de muestreo no es precisa y puede introducir errores importantes en el mapeo digital del suelo.
5. La densidad de muestreo es irregular; puede ser muy alta en algunas áreas e insuficiente en otras.
6. Como la información procede de proyectos diferentes, ejecutados a lo largo de muchos años, se puede dificultar el modelado de propiedades dinámicas del suelo (como carbono orgánico, sales y macronutrientes), así como la integración entre datos heredados y datos nuevos.

Variables Ambientales Auxiliares

Las variables auxiliares utilizadas representan a factores formadores de suelo.

Las variables auxiliares usadas con más frecuencia son: _____

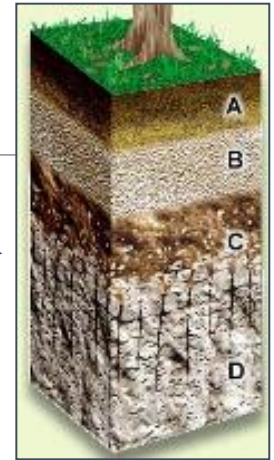
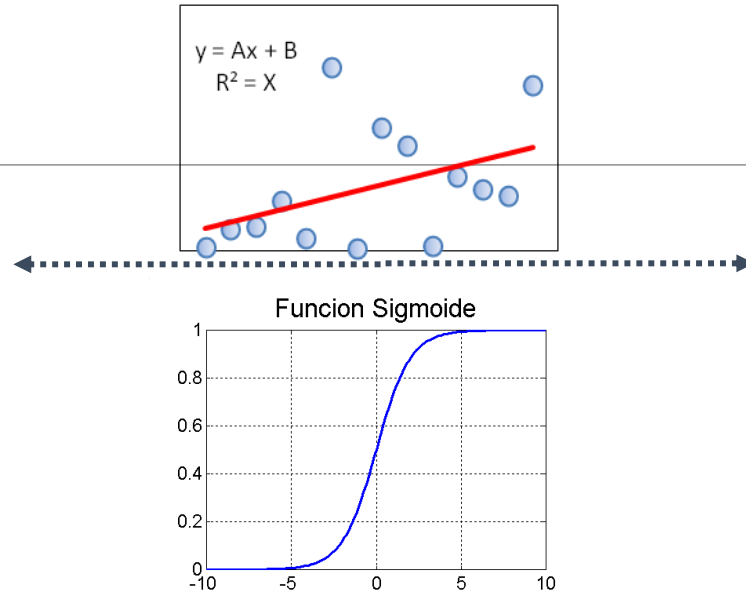
- Parámetros calculados a partir de modelos digitales de elevación (MDE).
- Datos de teledetección.
- Mapas convencionales de geología, geomorfología, vegetación, clima y suelos.

La selección de las variables auxiliares relevantes en un área determinada es crucial.

Puede basarse en la experiencia de expertos sobre relaciones suelo-paisaje; pero la decisión puede ser sesgada o incluso fallar en regiones donde el conocimiento sobre estas relaciones es insuficiente.

Métodos de Inferencia Espacial

- Las primeras aplicaciones de cartografía digital del suelo cubrieron áreas pequeñas, con relaciones relativamente claras entre atributos del suelo y del paisaje.
- La regresión lineal fue el método más utilizado, inicialmente, para establecer relaciones cuantitativas entre propiedades del suelo y del paisaje.
- Esto obedece a su simplicidad, eficiencia computacional, facilidad de uso e interpretación directa.
- Sin embargo, en áreas extensas, los modelos de regresión lineal tienden a producir errores muy altos en la predicción espacial de atributos del suelo.



Las relaciones suelo-paisaje en áreas extensas por lo general no son lineales, sino más bien complejas y dinámicas.

Algunos cambios laterales del suelo son abruptos mientras que otros son graduales e imprecisos.

🌐 Modelar las relaciones suelo-paisaje por medio de métodos lineales es una opción factible solo en áreas pequeñas con pendiente suave

🌐 En áreas más extensas y complejas se deben usar otros métodos que permitan modelar relaciones no lineales, complejas y con ruido.

🌐 Los métodos más usados incluyen:

- Combinación de métodos lineales (Ej. regresión + kriging)
- Métodos de aprendizaje automático (machine learning)

Kriging de Regresión (Regression kriging)

**Supone que la
variación
espacial del
suelo incluye**

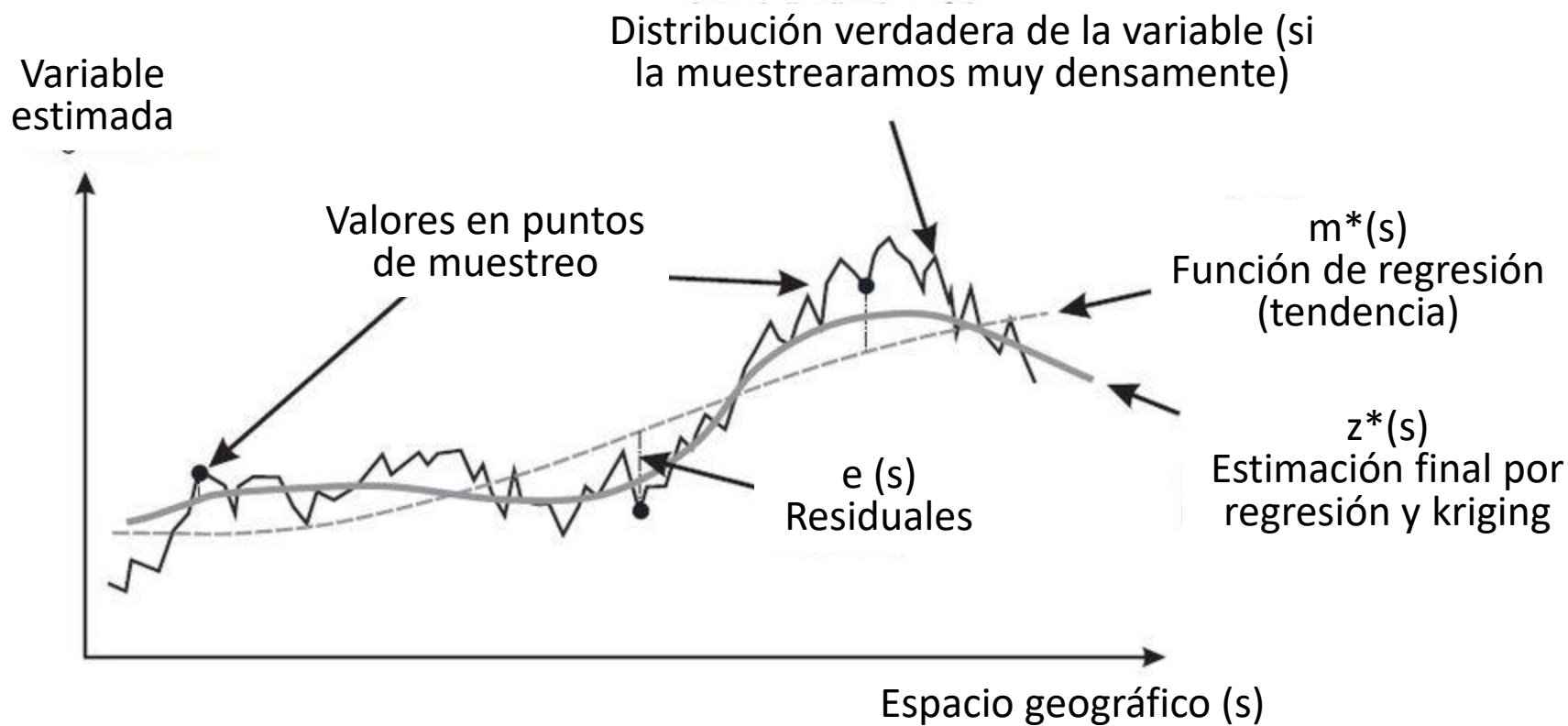
- 1. Una tendencia espacial
- 2. Una variación residual espacialmente dependiente
- 3. Una variación remanente aleatoria

**Combina dos
métodos lineales
de predicción
espacial**

- Estimación de la tendencia espacial por regresión
- Interpolación por kriging de los residuales de la regresión que muestren dependencia espacial,

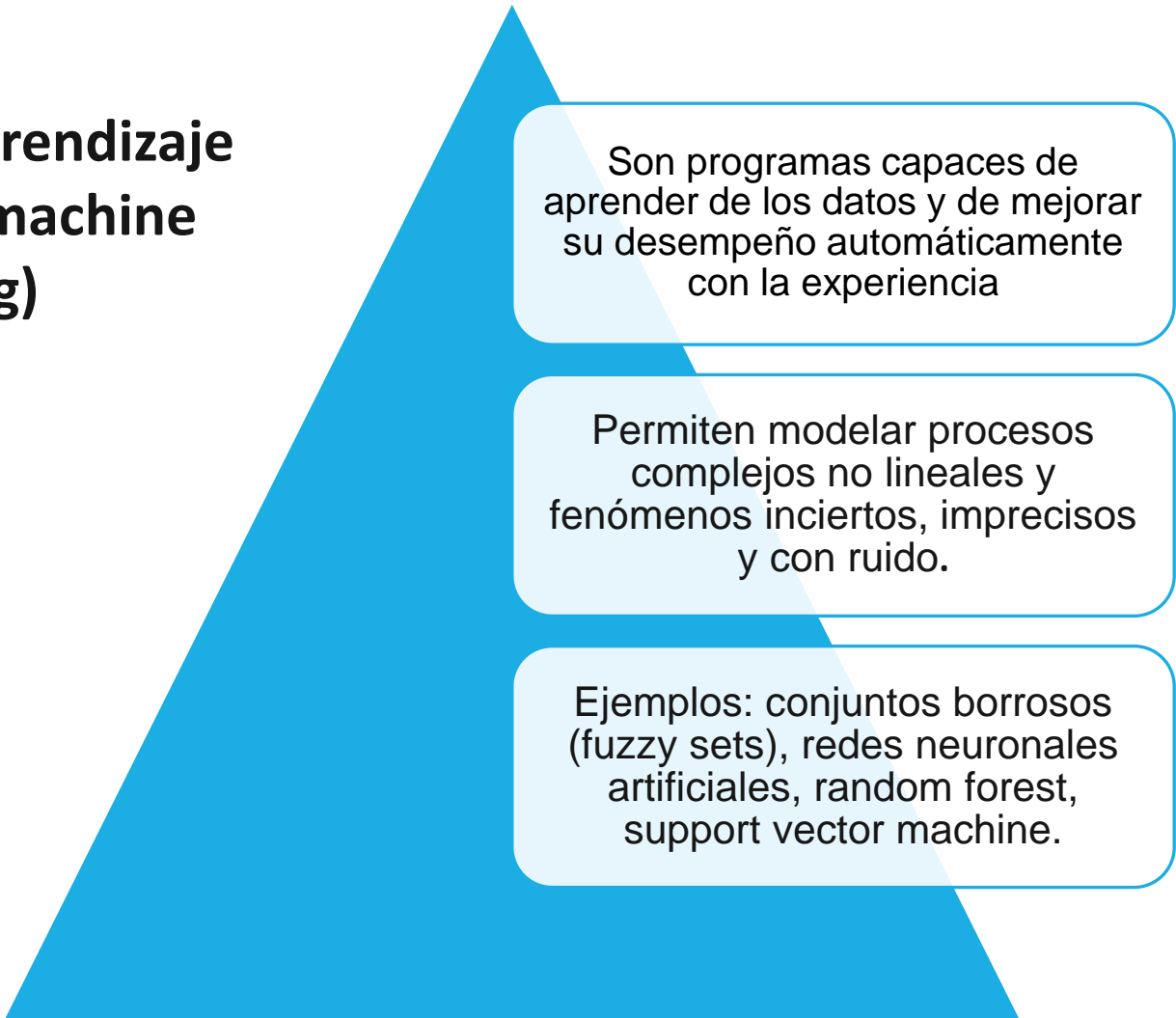
$$Z(s) = m(s) + e(s) + e'$$

Esquema idealizado de Kriging de regresión



$$z^*(s) = m^*(s) + e(s) + e'$$

Métodos de aprendizaje automático (machine learning)



Son programas capaces de aprender de los datos y de mejorar su desempeño automáticamente con la experiencia

Permiten modelar procesos complejos no lineales y fenómenos inciertos, imprecisos y con ruido.

Ejemplos: conjuntos borrosos (fuzzy sets), redes neuronales artificiales, random forest, support vector machine.

RED DE AGRUPAMIENTO BORROSO DE KOHONEN (FKCN, por Fuzzy Kohonen Clustering Network)

- Resulta de la fusión propuesta por Bezdek *et al.* (1992) de un algoritmo de redes neuronales autoorganizado (SOM) y otro de clasificación borrosa (FCM).
- Este modelo fue implementado en la Universidad Central de Venezuela, para su aplicación a la cartografía digital del suelo y el paisaje.

Validación de los Resultados

● Es una estimación objetiva y reproducible de la incertidumbre de las predicciones. Determina la calidad del mapa y su utilidad para usos específicos. Se puede realizar por validación externa, validación cruzada o ambas.

● Validación externa:

- Se realiza con datos independientes, no utilizados para la creación del modelo de predicción.
- Los datos independientes pueden proceder de un muestreo probabilístico adicional o se puede dividir aleatoriamente los datos disponibles en dos subconjuntos: uno de entrenamiento que incluye 70% a 80% de los datos y otro de validación con los datos restantes.

Validación de los Resultados

Validación cruzada:

- Se divide al azar el conjunto total de datos en subconjuntos de igual tamaño. En cada división se reserva uno de los subconjuntos para validación y se utilizan los otros para entrenamiento del modelo.

Con los datos de entrenamiento se genera el modelo de predicción espacial y, con los de validación, se evalúan estadísticamente las desviaciones entre los valores medidos y los valores estimados por el modelo.

Validación de los Resultados

La validación estadística produce una estimación cuantitativa de la calidad del mapa.

Sin embargo, esta evaluación no es suficiente. Es necesario considerar también el ajuste del modelo a los procesos de formación del suelo y a las relaciones entre este y el paisaje.

Fortalezas de la Cartografía Digital del Suelo:

1. Todas las reglas para producir resultados están documentadas. La investigación es reproducible.
2. Permite más flexibilidad con relación a la producción de mapas a solicitud de los usuarios y a la resolución espacial de estos mapas.
3. Los mapas se pueden actualizar más rápidamente y a menor costo.
4. Proporciona estimaciones estadísticas del grado de incertidumbre de las predicciones.

Debilidades de la Cartografía Digital del Suelo:

1. Las técnicas son sensibles a anomalías e inconsistencias en los datos de entrada. Se pueden crear errores serios y reducir la precisión de la predicción, más fácilmente que con los métodos tradicionales.
2. El ajuste de modelos con conjuntos de datos grandes y complejos puede llevar mucho tiempo y la selección del "mejor" modelo suele ser problemática.
3. La incorporación explícita del conocimiento pedológico para abordar los problemas anteriores es un desafío.
4. Los mapas de propiedades individuales del suelo producidos por métodos digitales tienden a considerar el suelo como una superficie y no como un cuerpo tridimensional.

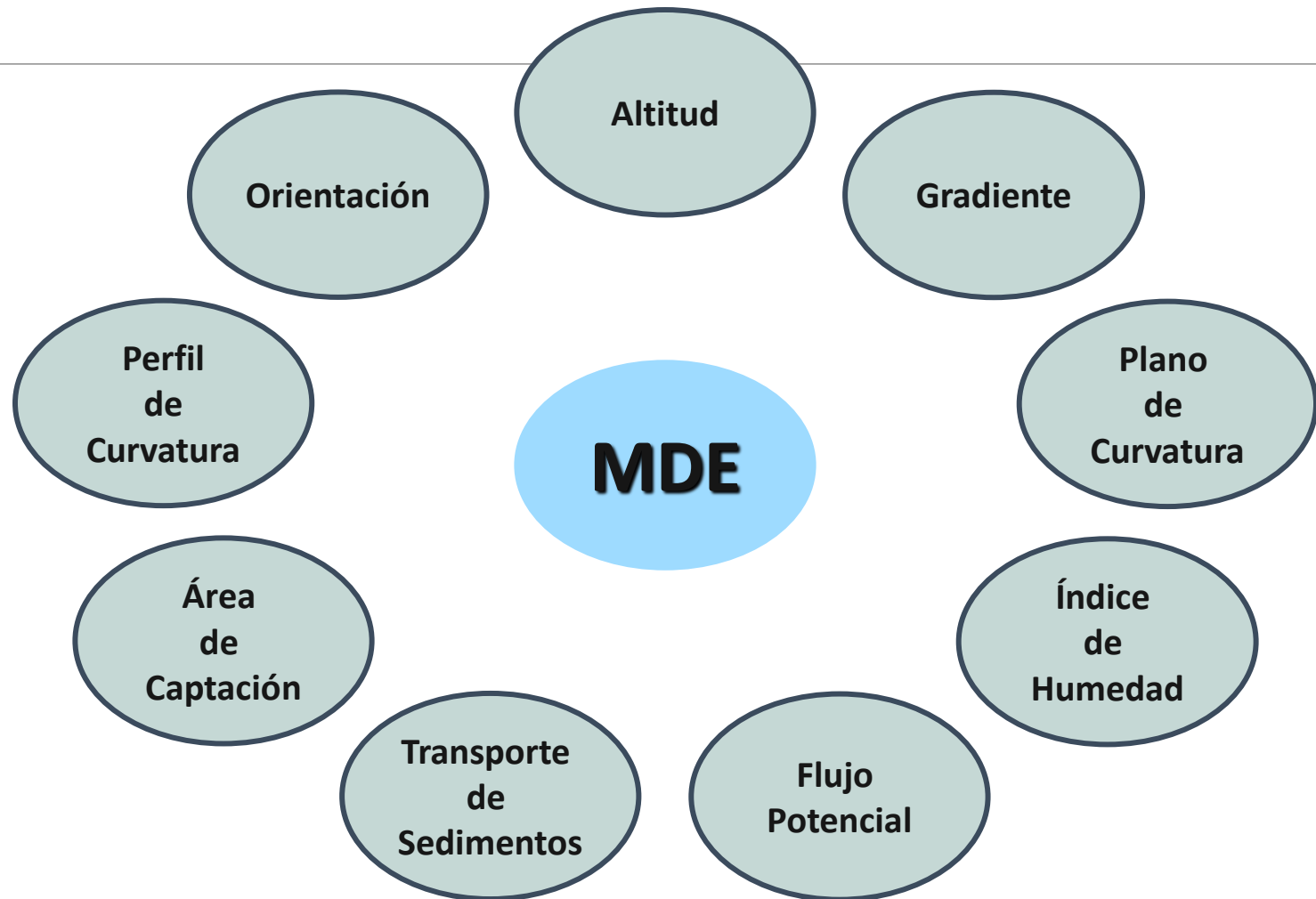
ENSAYOS DE APLICACIÓN DE CARTOGRAFÍA DIGITAL DEL SUELO EN DIVERSOS TIPOS DE PAISAJE Y CON DIFERENTES MÉTODOS

An aerial photograph of a mountainous landscape, likely in the Serranía del Interior of Aragua, Venezuela. The terrain is characterized by dense green vegetation covering the slopes of numerous ridges and valleys. A prominent white line, possibly a road or a river boundary, runs across the upper left portion of the image. The overall scene depicts a complex topographic environment.

Cuenca del río Caramacate (Serranía del Interior, estado Aragua)

Viloria, et al. 2016. *Geomorphology*, 253: 199-207

VARIABLES AUXILIARES DERIVADAS DE UN MDE



VARIABLES AUXILIARES DERIVADAS DE UNA IMAGEN SATELITAL

Imagen SPOT 4:

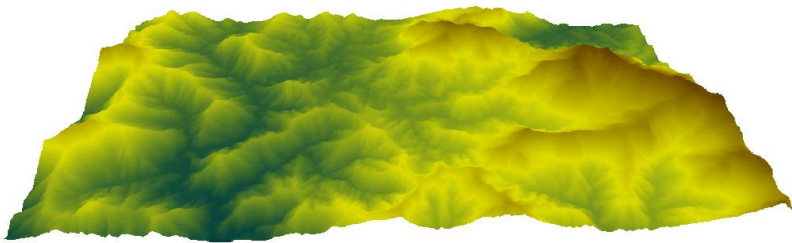
Banda XS1, de 0.50 a 0.59 μ (verde)

Banda XS2, de 0.61 a 0.68 μ (rojo)

Banda XS3, de 0.79 a 0.89 μ (IR cercano)

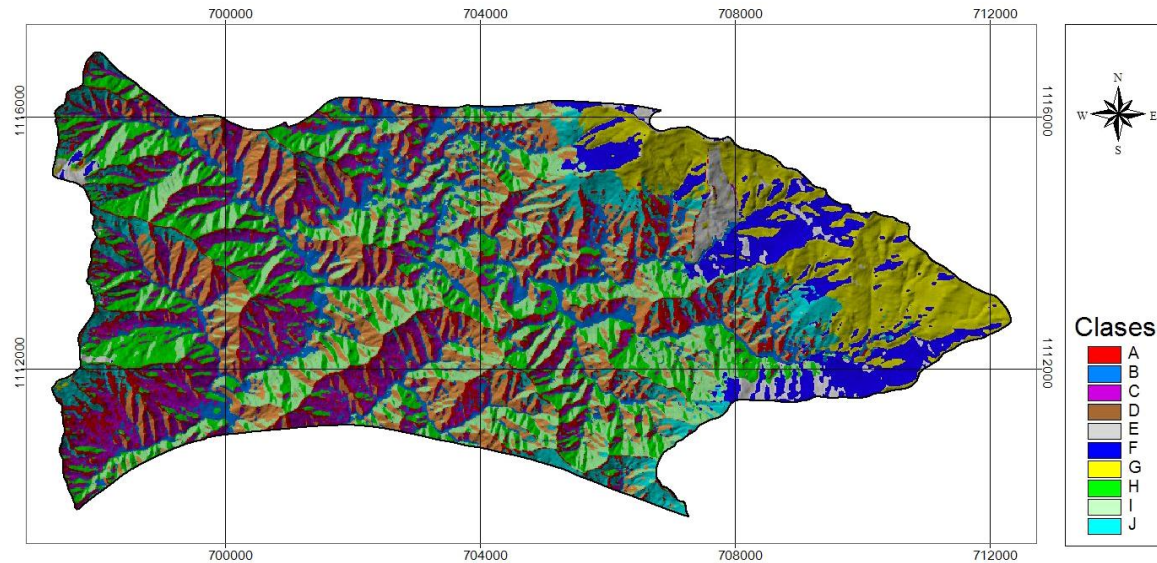
Índice de Vegetación:

$$NDVI = (XS3 - XS2) / (XS3 + XS2)$$



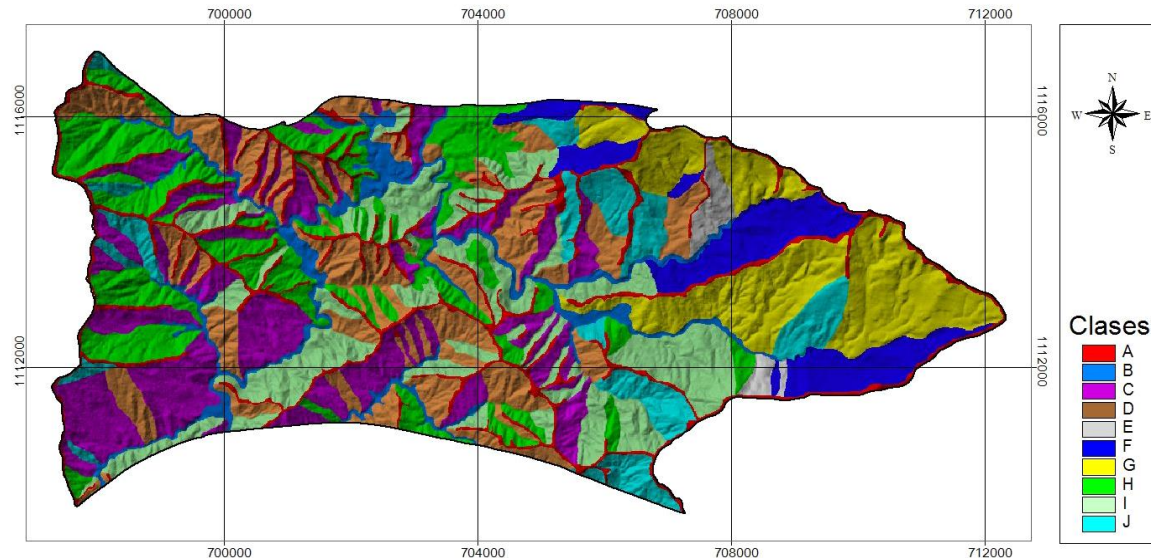
Resultado

**Modelo digital
producido por red
neuro borrosa (FKCN)**



**Mapa
geomorfológico
producido por
cartografía
convencional**

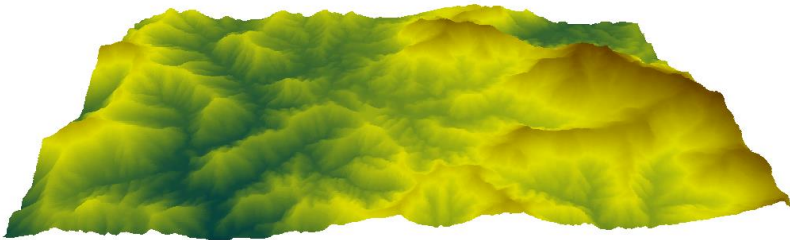
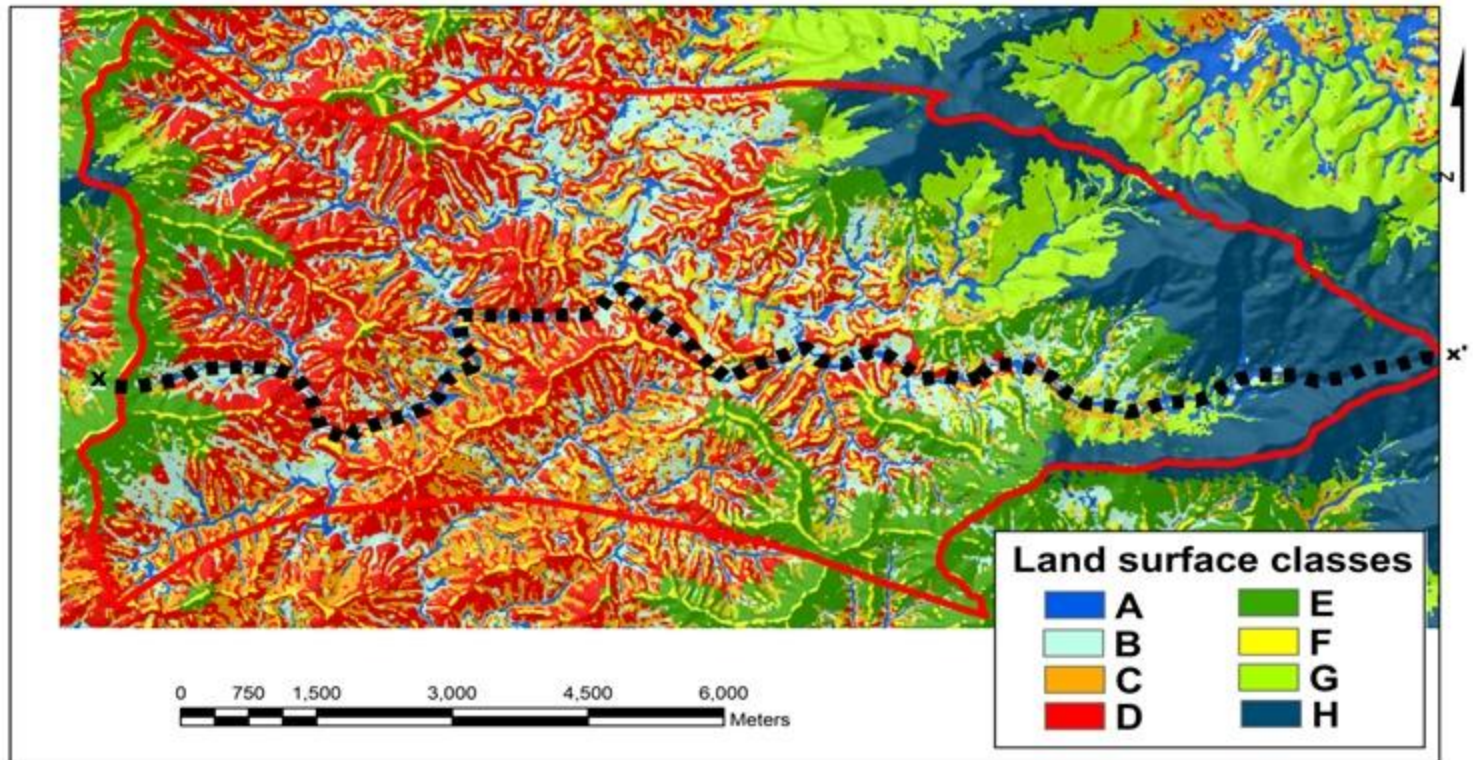
Índice Kappa= 0,90



La red neuronal borrosa FKCN produce un modelo espacial continuo formado por una cuadrícula de celdas. Cada celda contiene un conjunto de valores de pertenencia a diversas clases de suelo-paisaje. Para representar el modelo en un mapa, se asignó a cada celda la clase con el valor de pertenencia más alto.

FKCN produjo un mapa muy semejante al mapa convencional de unidades discretas (polígonos). La producción del mapa digital convencional tomó 10% (9 días) del tiempo necesario para crear el mapa convencional por interpretación visual (90 días).

Ambos mapas reflejan una gran influencia de la orientación de la pendiente. Al remover esta variable ambiental de los datos de entrada se obtuvo un modelo digital más ajustado a la variación del relieve en el área de estudio (siguiente diapositiva).



El modelo producido por FKCN permitió identificar visualmente el límite (línea punteada) entre dos unidades geológicas (metalavas y metatobas) presentes en el área

Errores de predicción del contenido de carbono orgánico del suelo en la cuenca del río Caramacate

Modelos	R	RMSE
G	0,63	0,75
SOM	0,06	0,21
FKCN	0,26	0,21
SOM+G	0,35	0,17
FKCN+G	0,71	0,14

R: correlación ente los valores estimados y medidos. Indica la exactitud de la predicciones.

RMSE: raíz del error medio cuadrático. Indica la precisión de la predicciones.

Substrato geológico (G), redes neuronales artificiales: SOM (discreta), FKCN(borrosa)

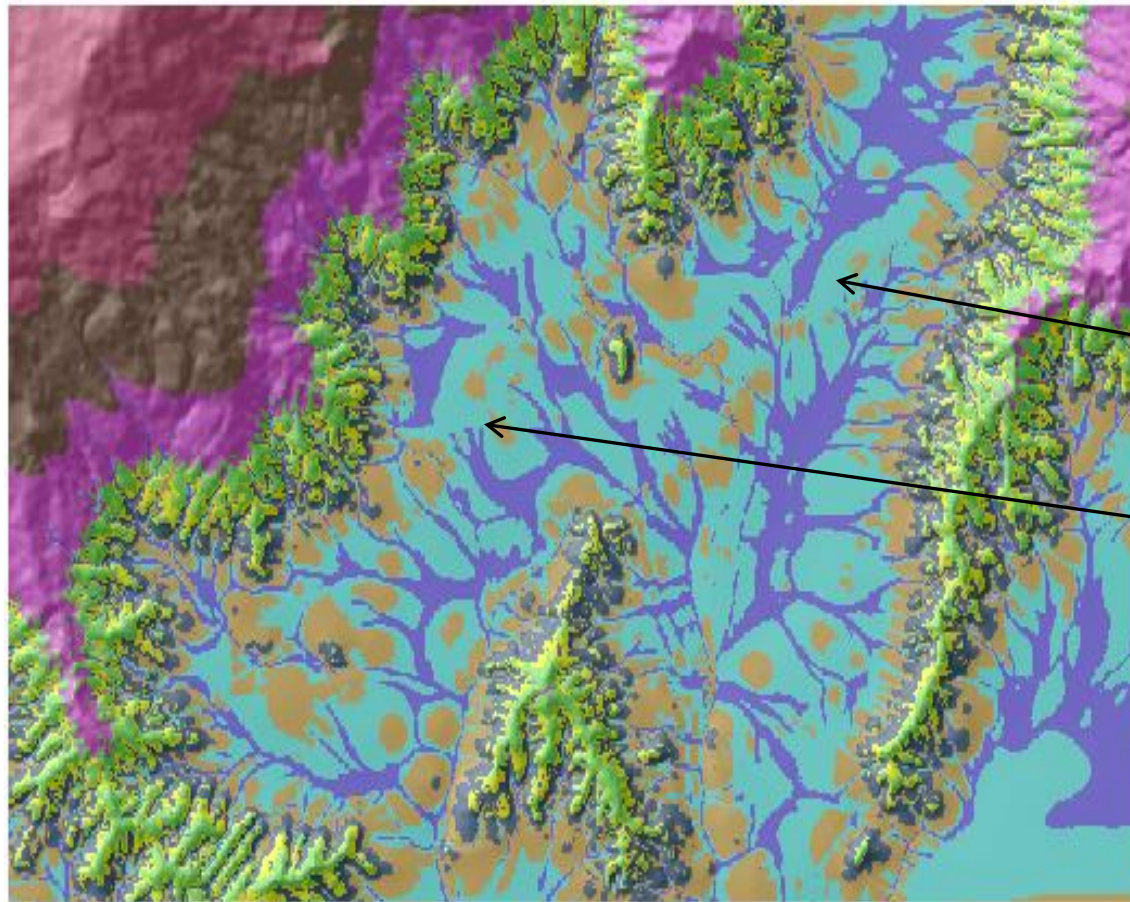
La exactitud de las predicciones basadas solo en la geología es aceptable pero la precisión es muy baja. El modelo FKCN produjo predicciones más exactas que el modelo SOM. La mayor exactitud y precisión se logró al subdividir las clases del modelo FKCN de acuerdo al substrato geológico



Valles de los ríos Aguirre y Montalbán (estado Carabobo)

Este ensayo de cartografía digital se realizó para evaluar la utilidad de FKC_N para modelar digitalmente relaciones suelo-paisaje en un área plana

MAPA DE CLASES DE TERRENO PRODUCIDO POR FKCN



▲
N

Valle del río Aguirre
(Sistema deposicional longitudinal)

Valle del río Montalbán
(Sistema deposicional lateral)

Clases de Terreno




A B C D E F G H I

0 1,000 2,000 4,000 6,000 8,000 10,000
Metros

Relación entre las clases de terreno y la variación de propiedades del suelo en los valles de Aguirre y Montalbán

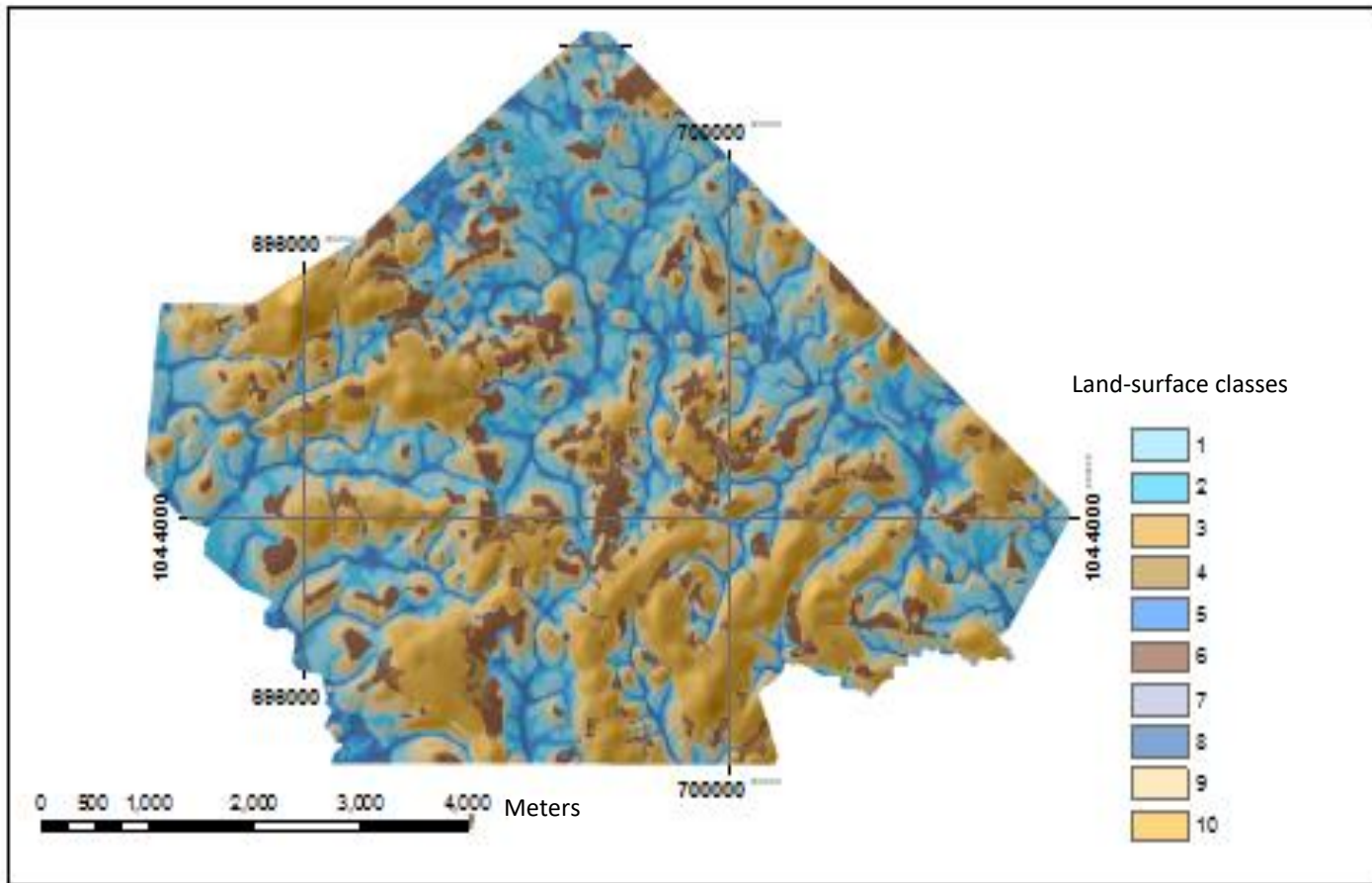
Propiedad del suelo	Unidades	Varianza entre clases	Varianza intraclase	Correlación intraclase
CO	%	12,51	0,79	0,94
Arena	%	2140,38	193,12	0,92
Limo	%	624,73	202,43	0,76
Arcilla	%	422,99	146,80	0,74
Ca	mg/ kg	79,82	10,62	0,88
CIC	cmol /kg	153,44	37,04	0,81
K	mg/ kg	0,18	0,07	0,72
Mg	Una correlación intraclase > 0,5 indica que la clase de terreno tiene una alta capacidad de predicción de la propiedad del suelo.			0,39
Na				0,38
pH				0,36



Paisaje de altiplanicie en los Llanos altos centrales, Estado Guárico, Venezuela

Este ensayo de cartografía digital se realizó para producir un mapa convencional de suelos, con apoyo de FKC�, en un área donde la cobertura boscosa no permitía la identificación de los límites de unidades cartográficas por fotointerpretación

Viloria y Pineda, 2016. *In Geopedology* (pp. 389-396).

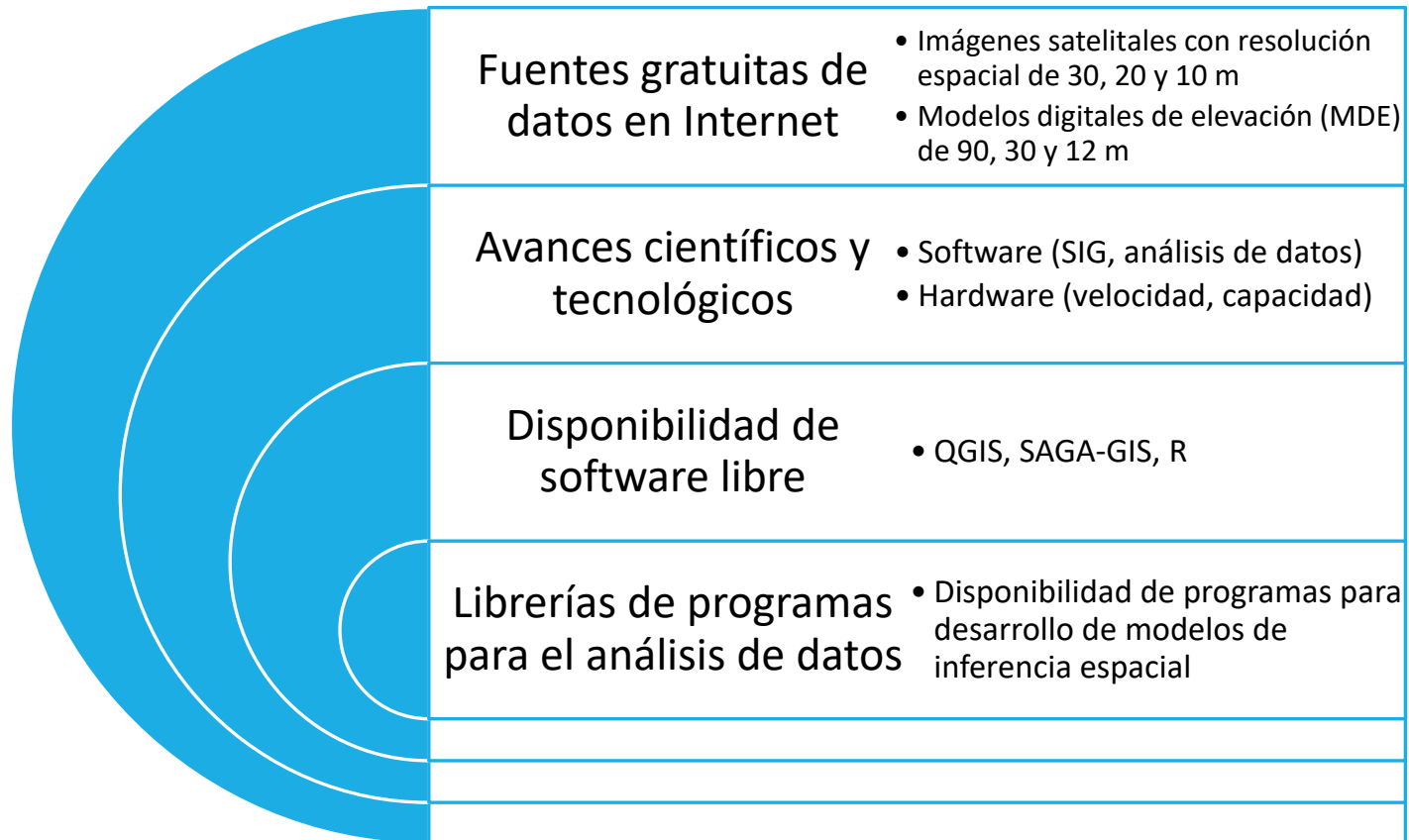


Land-surface class	RH (m)	Land_C (x10 ⁻⁴)	TWI	As (km ²)	Slope (%)	Physiography
1	1.2	-1	10.9	2.0	2.00	Lower Valley
2	0.9	-2	12.6	6.0	1.10	Valley bottom
3	10.8	6	9.8	1.0	3.30	Hilltop
4	7.8	0	13.2	5.2	0.60	Upper valley
5	0.9	-1	14.2	12.5	0.60	Valley bottom
6	5.3	1	11.1	2.4	1.60	Mesa
7	3.6	0	14.8	19.5	0.50	Middle valley
8	0.1	-1	16.8	228.9	0.30	Valley floor
9	3.1	0	10.0	1.5	4.10	Lower slopes and isolated Hillocks
10	7.6	2	9.4	1.1	7.41	Upper slopes

RH (m): relative height; Land_C: landscape curvature; TWI: topographic wetness index; As (km²): catchment area.

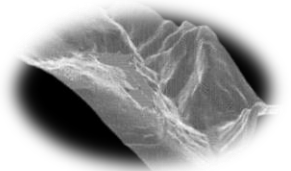
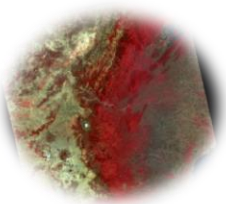
Land-surface class	Physiography	Dominant soil class ¹	Soil drainage class	Rock fragments at the surface %
8	Valley floor	Vertic Fluvaquents	Imperfectly drained	<0.01
2; 5	Valley bottom	Ustic Epiaquents	Imperfectly drained	0.01-3
1	Lower valley	Chromic Haplusterts	Moderately well drained	0.01-3
7	Middle valley	Chromic Haplusterts	Moderately well drained	<0.01
4	Upper valley	Chromic Haplusterts	Well drained	> 50
9	Lower slopes and isolated hillocks	Vertic Haplustalfs	Well drained	15 - 50
10	Upper slopes	Vertic Haplustalfs	Well drained	15 - 50
6	Mesa	Typic Haplustalfs	Well drained	> 50
3	Hilltop	Typic Haplustalfs	Well drained	> 50

Factores favorables al desarrollo de la cartografía digital del suelo



SÍNTESIS

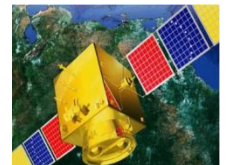
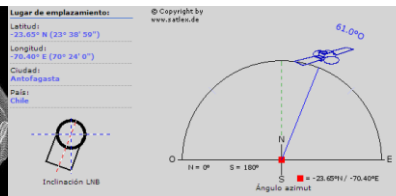
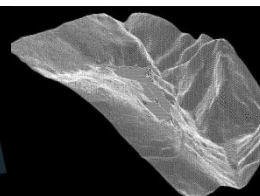
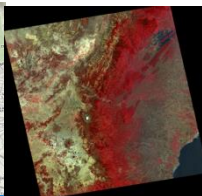
- El mapeo digital del suelo comenzó como un desarrollo experimental en la década de 1990. Sin embargo, hoy en día, se ha convertido en una alternativa eficaz para producir información de suelos.
- En sus inicios se tendió a considerar que la cartografía digital era un enfoque opuesto al mapeo convencional de suelos. Hoy se reconoce que ambas metodologías son más bien complementarias y sinérgicas. Las fortalezas de un método pueden ser aprovechadas para superar las debilidades del otro y viceversa.



- El mapeo digital del suelo reduce drásticamente el tiempo necesario para producir mapas de suelo y permite representar la variación espacial del suelo como un continuo con unidades discretas.
- Sin embargo, no es un método automático de producción de mapas. Se necesita el conocimiento experto en pedogénesis y geomorfología para seleccionar las variables ambientales de entrada y para interpretar los resultados.
- La cartografía digital es más bien un análisis de los datos para extraer información relevante, que conduce a proponer modelos sobre la naturaleza de la variación espacial del suelo y el paisaje.
- Estos modelos deben ser contrastados con conocimientos de génesis de suelos y datos de campo para determinar su grado de certeza.

Los métodos de cartografía digital del suelo, usados de manera incorrecta, pueden conducir a cometer graves errores que pueden quedar ocultos tras atractivas presentaciones de mapas.

Es necesario formar profesionales capacitados en la aplicación de fundamentos científicos y técnicos de este enfoque, como base para utilizar correctamente esta tecnología.



Predicción de Propiedades del Suelo



“¿Cómo lo quiere, con la bola de cristal o con probabilidad estadística?”