

Influencia de los factores formadores en las propiedades de los suelos en la Mixteca, Oaxaca, México

Influence of factors of soil formation in the properties of soils in Mixteca, Oaxaca, México

María de Lourdes Figueroa Jáuregui¹, Mario Roberto Martínez Menez^{1‡},
Carlos Alberto Ortiz Solorio² y Demetrio Fernández Reynoso¹

¹ Postgrado en Hidrociencias, ² Postgrado en Edafología, Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km. 36.5. 56230 Montecillo, Estado de México, México.

‡ Autor responsable (mmario@colpos.mx)

RESUMEN

El proceso de formación del suelo está determinado por la interacción de seis factores de formación: clima, organismos, topografía, material parental, tiempo y uso, la magnitud de cualquiera de las propiedades del suelo está determinada por la acción de estos factores. En este trabajo se determinaron cuáles son los factores de formación que influyen en el tipo y propiedades del suelo en la cuenca rancho Dolores en la región mixteca en el estado de Oaxaca. Se realizó un análisis de componentes principales y una clasificación no supervisada para la delimitación de unidades de suelo, en las que se realizaron muestreos y análisis de laboratorio de algunas propiedades físicas y químicas. Los factores de formación que explicaron la variabilidad de los suelos de la cuenca fueron: pendiente, índice de posición topográfica, material parental y uso del suelo. Se delimitaron cinco unidades de suelos con su distribución espacial en la cuenca y se asociaron con sus propiedades de textura, densidad aparente, capacidad de campo, punto de marchitez permanente, porcentaje de saturación, conductividad hidráulica saturada, pH y contenido de materia orgánica. Existe una fuerte relación entre los parámetros del relieve y los suelos, por lo que se recomienda el estudio de la formación, distribución, y cartografía de los suelos desde un punto de vista geomorfológico, así como del análisis de la vegetación.

Palabras clave: *proceso de formación del suelo, unidades de suelos, propiedades físicas y químicas, distribución espacial.*

SUMMARY

The soil-forming process is determined by the interaction of six soil-forming factors: climate, organisms, topography, parent material, time and soil use; the magnitude of all soil properties is determined by the action of these factors. In this work we determined the forming factors that influence the type of soil present in the rancho Dolores watershed in the Mixteca region in the state of Oaxaca, as well as the properties of these soils. An analysis of principal components and an unsupervised classification for the delimitation of soil units were carried out, in which samplings and laboratory analysis of some physical and chemical properties were carried out. The forming factors that explain the variability of the soils of the watershed were slope, topographic position index, parental material and land use. Five soil units were delimited with their spatial distribution in the watershed and associated with their properties of texture, apparent density, field capacity, permanent wilting point, saturation percent, saturated hydraulic conductivity, pH and organic matter content. There is a strong relationship between the relief parameters and the soils, reason why we recommend the study of the formation, distribution, and cartography of soils from a geomorphological point of view, as well as the analysis of vegetation.

Index words: *soil forming process, soil units, physical and chemical properties, spatial distribution.*

Cita recomendada:

Figueroa Jáuregui, M. L., M. R. Martínez Menez, C. A. Ortiz Solorio y D. Fernández Reynoso. 2018. Influencia de los factores formadores en las propiedades de los suelos en la Mixteca, Oaxaca, México. *Terra Latinoamericana* 36: 287-299.

DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v36i3.259>

Recibido: mayo de 2017. Aceptado: junio de 2018.

Publicado en *Terra Latinoamericana*: 36: 287-299.

INTRODUCCIÓN

El suelo es un cuerpo natural diferenciado en horizontes compuestos de material orgánico y mineral, que varía de modo continuo en el espacio y en el tiempo. El suelo se diferencia del material parental subyacente en morfología, propiedades físicas, químicas y biológicas (Zapata, 2002; Jenny, 1941). La transformación del material parental a suelo se denomina proceso de formación del suelo o proceso pedogenético, y está determinado por la interacción del clima, organismos, topografía, material parental y tiempo [$s = f^{\circ}(cl, o, r, p, t)$], conocidos como factores de formación del suelo (Jenny, 1941; Phillips, 1998; Blanco y Sensiales, 2001; Buol *et al.*, 2011). La magnitud de cualquiera de las propiedades del suelo tales como pH, contenido de arcilla, porosidad, densidad, carbonatos, etc., está determinada por la acción de los factores de formación del suelo, ya sea de forma independiente o conjunta.

Algunos autores consideran a la actividad humana como el sexto factor de formación de suelos (Amundson y Jenny, 1997; IMT, 1998; Blanco y Sensiales, 2001), como en el caso de los Tecnosoles (IUSS, 2007). En contraste, otros autores lo consideran un factor modificador, ya que el ser humano es capaz de modificar de manera directa o indirecta las características morfológicas, físicas y químicas de los suelos, ya sea por manejo de la vegetación (Muñoz-Iniestra *et al.*, 2009; Neris *et al.*, 2012; Arnold *et al.*, 2015; Rubinić *et al.*, 2015), modificación del relieve (Soriano *et al.*, 1996; Blanco y Sensiales, 2001; Chinchilla *et al.*, 2011; Hernández *et al.*, 2012), riego (Rascón *et al.*, 2008; Al-Ghobari, 2011) o pastoreo (Evans *et al.*, 2012; Mora *et al.*, 2017), entre otros (Dudal, 2004).

La necesidad de conocer la distribución espacial de los suelos, así como sus características, para aprovechar este recurso en las actividades humanas, agrícolas y ganaderas, ha impulsado una gran cantidad de investigaciones y el desarrollo de metodologías para la elaboración de mapas (IICA, 2016). El levantamiento detallado de suelos implica una gran inversión de tiempo y dinero, lo que explica en parte la escasez de mapas detallados y actualizados (Abarca y Bernabé, 2010), por ello, en las últimas décadas han surgido una serie de métodos para la elaboración de cartografía de suelos, tales como los mapas digitales de suelos (Colín *et al.*, 2017).

La Mixteca Oaxaqueña es una región con gran diversidad de ecosistemas y ambientes contrastantes, sin embargo, existe desconocimiento de los recursos naturales con que se cuenta, especialmente el suelo. La escasez de mapas detallados de suelos en esta región, así como la falta de precisión de los existentes, conlleva a una mala planeación de las actividades agrícolas y ganaderas, y en consecuencia, altos índices de degradación y erosión. Por tanto, el objetivo de este trabajo fue determinar la distribución espacial de los suelos en la cuenca rancho Dolores en la región mixteca en el estado de Oaxaca, con base en un análisis integral de los factores formadores utilizando herramientas digitales escala 1:50 000; como una metodología alternativa para identificar las diferencias en las propiedades físicas y químicas de los suelos y su distribución en un área.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

El estudio se llevó a cabo en la cuenca rancho Dolores en el estado de Oaxaca, localizada dentro de las coordenadas 17° 49' 53" y 17° 54' 13" N, y 97° 45' 08" y 97° 48' 41" O, con una superficie de 18.80 km², que pertenece a la cuenca del río Mixteco, dentro de la Región Hidrológica 18: Balsas.

Según la clasificación climática de Köppen, modificada por García (1981), se tiene un clima BS1kw, semiárido, templado, con temperatura media anual entre 12 y 18 °C, régimen de lluvias de verano, con una precipitación media anual de 704.10 mm. La cuenca se encuentra en un rango de elevación de 1638 a 2285 m, con una altura media de 1817 m, y pendientes predominantes de 20 a 50%, destacando pequeñas planicies dedicadas a la agricultura en los márgenes de las corrientes, laderas de gran longitud y poca pendiente, hasta lomeríos muy accidentados de difícil acceso. De acuerdo con la carta geológica de INEGI (1981) los tipos de material presentes en la cuenca son: Arenisca-Conglomerado que representa el 39.6% de la superficie de esta, y Andesita-Brecha volcánica que ocupa el 60.4%. El mapa edafológico de INEGI escala 1:250 000 (2004) muestra suelos del tipo Regosol calcárico en la mayor parte de la cuenca, y Vertisol crómico en la parte baja y márgenes del cauce principal. La vegetación predominante es el pastizal

inducido con vestigios de matorral xerófito y selva baja, así como bosque de encino en la parte alta de la cuenca; el uso de suelo es pecuario y agrícola.

Factores de Formación de Suelos

Los factores de formación de suelos que se consideraron en este trabajo fueron clima, vegetación, relieve y material parental, de acuerdo con el Soil Survey Division Staff (1993).

Clima. Los parámetros que se consideraron dentro del factor clima fueron la precipitación y el índice topográfico de humedad. Los datos de precipitación pluvial se obtuvieron de las estaciones meteorológicas más cercanas a la cuenca, se consideraron ocho estaciones para el trazo de polígonos de Thiessen considerándose un periodo de 20 a 30 años de registros. El índice topográfico de humedad (ITH) es un parámetro de interés para predecir las características físicas del suelo e identificar zonas de mayor disponibilidad hídrica (Domingo-Santos *et al.*, 2013). Para su estimación se utilizó la Ecuación 1 (Deng *et al.*, 2007):

$$ITH = \ln \left(\frac{A_s}{\tan \beta} \right) \quad (1)$$

donde: A_s : acumulación del flujo.

β : pendiente en grados.

El cálculo del índice topográfico de humedad se realizó en ArcGis 10.1, la acumulación del flujo se obtuvo rellenando las pequeñas depresiones (*FILL*) en la superficie del modelo digital de elevación de resolución 15 m, posteriormente se elaboró un mapa en formato *raster* que muestra la dirección del flujo analizando la altitud de cada celda y de las celdas vecinas, a partir del cual se obtuvo la acumulación del flujo. La pendiente del terreno se determinó directamente en porcentaje con las herramientas de superficie del software, ya que pendiente (%) = tan (pendiente en grados).

Vegetación. Se consideraron los parámetros de vegetación y uso del suelo, índices de vegetación y porcentaje de cobertura vegetal, obtenidos a partir de una imagen de satélite Spot 6 con fecha cuatro de noviembre de 2014, que consta de una banda pancromática con resolución de 1.5 m y una imagen multispectral de cuatro bandas (azul, verde, roja e infrarroja) con resolución de 6 m, a la cual se aplicó una corrección atmosférica. Para la obtención del

mapa de vegetación y uso del suelo se hizo una fusión (*pansharpening*) de la banda pancromática con la imagen RGB (bandas 1, 2 y 3) con el software ArcGis 10.1 para obtener una imagen RGB con resolución de 1.5 m y sobre esta última se efectuó una delimitación y digitalización de la vegetación y uso de suelo, con previo reconocimiento en campo, utilizando el criterio inglés de área mínima cartografiable de 1 cm² (NOM-023, 2001), a una escala de 1:20 000, se utilizaron como base las cartas de INEGI para la nomenclatura de los tipos de vegetación de la cuenca.

Fue utilizado el índice de la vegetación de diferencia normalizada (Normalized Difference Vegetation Index-NDVI), que es un cociente que contrasta la reflectancia de las bandas infrarrojo cercano (NIR) y rojo (R), y se calcula de acuerdo con la ecuación 2 (Rouse *et al.*, 1974):

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (2)$$

donde: NIR y R corresponden a las bandas infrarrojo cercano y roja respectivamente.

Para la estimación del NDVI se realizó la conversión de niveles digitales de la imagen de satélite a valores de reflectancia para posteriormente obtener los índices de vegetación.

El porcentaje de cobertura vegetal se estimó por pixel con el método propuesto por Bingfang *et al.* (2004), que asume que cada pixel recibe dos señales del sensor, la proveniente del suelo y de la vegetación, y en consecuencia un valor de NDVI para cada una de estas señales. El porcentaje de cobertura vegetal se estimó con los valores de NDVI de la siguiente manera:

$$\%cv = \frac{(NDVI - NDVI_{sue})}{(NDVI_{veg} - NDVI_{sue})} * 100 \quad (3)$$

donde: % cv es el porcentaje de cubierta vegetal, NDVI es el índice de vegetación observado en el pixel *i*, NDVI_{sue} es el índice de vegetación de un pixel con suelo desnudo y NDVI_{veg} corresponde al índice de vegetación de un pixel completamente cubierto con vegetación.

Relieve. Dadas las condiciones particulares de la región se asumió que los factores del relieve de mayor importancia en la cuenca son la pendiente y el índice de posición topográfica (IPT) que es utilizado para

la determinación de las topoformas (Weiss, 2001). Para la caracterización del relieve de la cuenca se utilizó un modelo digital de elevación (MDE) de INEGI en formato *raster* con resolución de 15 m, se estimó la pendiente con las herramientas de superficie de ArcGis 10.1. El IPT se obtuvo comparando la elevación de cada celda en el MDE, con la elevación media de las celdas circundantes (Weiss, 2001):

$$IPT = z_0 - z_m \quad (4)$$

donde: z_0 es la elevación de la celda central y z_m es la elevación media de las celdas circundantes.

Material parental. Se consideró el tipo de roca predominante de acuerdo con la carta geológica de INEGI (1981) escala 1:250 000, a la que se realizó un recorte correspondiente a la cuenca rancho Dolores.

Análisis Estadístico y Delimitación de Suelos

Se realizó un Análisis de Componentes Principales (ACP), para determinar la correlación entre las variables de entrada (factores de formación) y seleccionar las variables no correlacionadas, que expliquen la mayor variabilidad de los suelos en la cuenca rancho Dolores. El ACP se realizó en ArcGis 10.1 con los factores de formación del suelo: clima (precipitación, ITH), vegetación (uso de suelo, NDVI y porcentaje de cobertura), material parental y relieve (pendiente e IPT). Algunas variables como tipo de roca y uso de suelo son de carácter alfabético por lo que se utilizaron correspondencias numéricas para definir las clases. Se seleccionaron aquellos componentes cuyos valores propios o *eigen valores* fueron mayores a la unidad de acuerdo al Criterio de Kaiser, y que explicaron el mayor porcentaje de variabilidad (Cuadras, 2007), los factores de mayor peso en dichos componentes se utilizaron para la determinación de las unidades de suelo.

Para la delimitación de las unidades de suelo, se creó un mapa en formato *raster* multibanda con los factores de mayor peso, sobre el que se realizó una clasificación no supervisada, que consiste en la agrupación de celdas con valores similares resultantes de la combinación de las bandas, cada agrupación fue definida como una clase, la cual corresponde a un tipo de suelo.

Se aplicó un filtro de mayoría para reducir la variabilidad local y eliminar el efecto de ruido (presencia de píxeles con valores diferentes a los predominantes en cierta área) en la imagen.

Una vez obtenidas las unidades de suelo, se definieron los sitios de muestreo, se colectaron muestras de suelo simples correspondientes a la capa superficial y subsuperficial del suelo en diez sitios distintos con un total de 18 muestras, cada sitio se ubicó con ayuda de GPS (Garmin Map 62s) y se registró la profundidad de muestreo.

A las muestras se le realizaron las siguientes determinaciones: textura por el método de la pipeta (Day, 1965), densidad aparente por el método de la parafina (Blake, 1965), capacidad de campo con olla de presión (Richards, 1949), punto de marchitez permanente con membrana de presión (Richards, 1949), porcentaje de saturación con el método gravimétrico (Gardner, 1965), conductividad hidráulica saturada con el permeámetro de carga constante (Klute y Dirksen, 1986), pH en agua con potenciómetro relación 1:2 y contenido de materia orgánica (%) por el método de Walkley y Black (1934), variables que determinan el comportamiento hidrológico de los suelos.

Se aplicó un análisis de regresión lineal múltiple teniendo como variables dependientes cada una de las propiedades analizadas de los suelos en la capa superficial, y como variables independientes los factores de formación seleccionados por el ACP, para obtener los coeficientes de correlación entre dichos factores y las características del suelo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Factores de Formación de Suelos

Clima. De las ocho estaciones meteorológicas consideradas para el trazo de polígonos de Thiessen, solo cuatro tuvieron influencia en la cuenca rancho Dolores: Huajuapán de León SMN 1.31 %, Huajuapán de León DGE 25.00%, Zapotitlán Palmas SMN 12.87% y Zapotitlán Palmas DGE 60.82%. La precipitación en la cuenca fue de 684.90 mm en la parte media y de 765.20 mm en las partes más altas, con una media ponderada de 704.10 mm.

El índice topográfico de humedad (ITH) presentó un rango entre -4.74 a 10.29 (Figura 1), valores superiores a 4.80 se encontraron en los ríos y en los márgenes de éstos, lo que indica acumulación de humedad en el suelo, por lo tanto, áreas con valores altos de ITH son zonas de concentración del escurrimiento (Roalobo y Kamp, 2012), mientras valores menores a -2.32 se localizaron en las partes altas con mayor

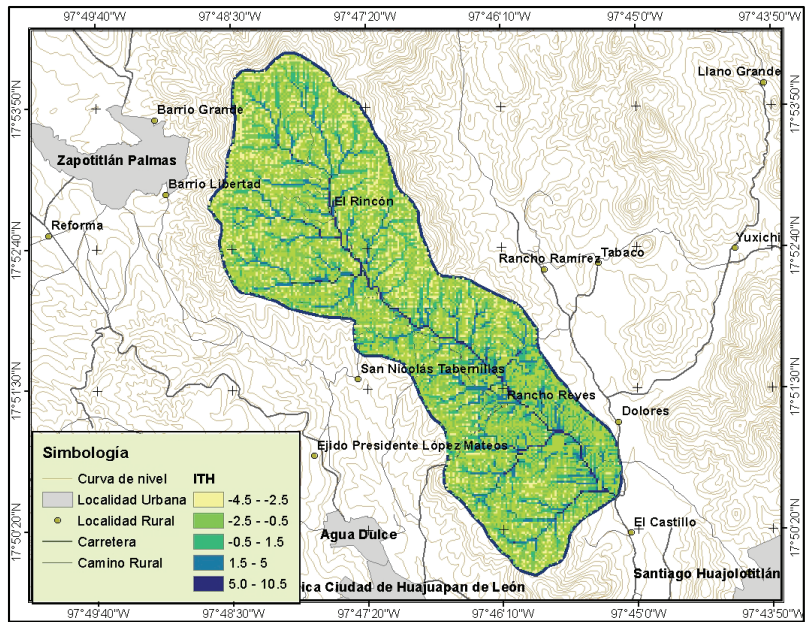


Figura 1. Índice topográfico de humedad (ITH) en la cuenca rancho Dolores.

pendiente. Este parámetro reflejó la tendencia del suelo a la acumulación de humedad y generación de escurrimiento, cuanto más elevado es el valor de este índice, mayor humedad se concentra en esa área.

Vegetación. La vegetación natural que se encontró en la cuenca fue bosque de encino en tierras altas, con altitudes cercanas a los 2000 m; matorral xerófilo en los valles y cañadas con altitudes superiores a

los 1500 m bajo sombras orográficas y selva baja en las zonas con altitudes entre 1000 y 1700 m. El uso del suelo correspondió a pastizales con vestigios de vegetación natural y agricultura de riego con cultivos anuales (Figura 2). La mayor parte de la cuenca se encontró ocupada por pastizales (46%) con algunas especies de matorral, en segundo lugar, se tuvo el bosque de encino que se encuentra en la parte más alta

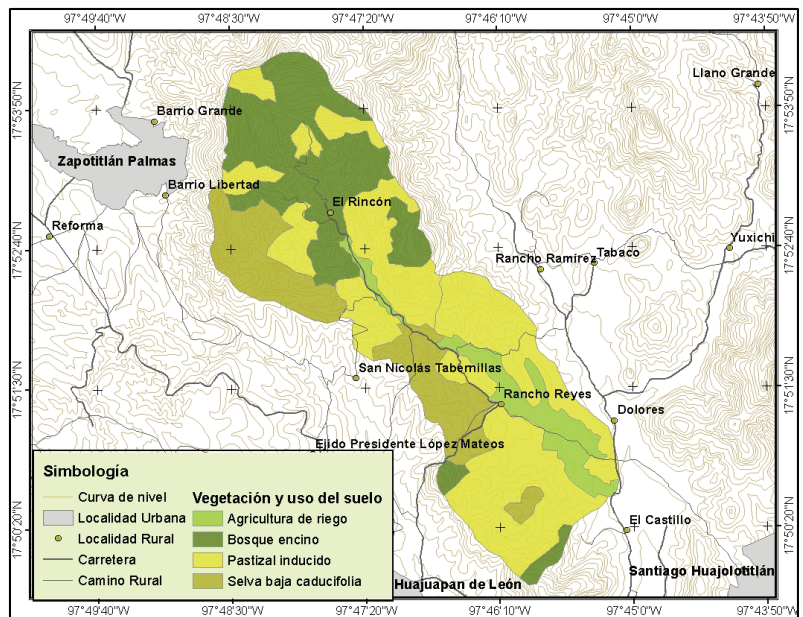


Figura 2. Vegetación y uso de suelo en la cuenca rancho Dolores.

de la cuenca y representó el 26.7% de la superficie de la misma, la selva baja caducifolia ocupó un área de 352 ha, lo que representó el 18% del total de la cuenca y por último la agricultura (8% de la superficie) con cultivo de maíz principalmente, ubicada sobre los márgenes del cauce.

El porcentaje de cubierta vegetal se calculó en función del índice de vegetación y se clasificaron en cuatro categorías (Cueva y Chalán, 2010):

0 a 10%: correspondió a suelo desnudo; 10 a 30%: degradado, formaciones provocadas por intervención humana, en donde se eliminó la vegetación natural o se expuso a continuas perturbaciones; 30 a 50%: ralo, formaciones vegetales naturales o inducidas con árboles dispersos, en donde se apreció la presencia de suelo o vegetación de tipo herbácea o matorrales con individuos dispersos y 50 a 80%: denso, formaciones vegetales cuya cobertura de dosel es igual o superior a 50% en ambientes secos y a 70% en ambientes húmedos.

El mayor porcentaje de suelo cubierto por vegetación se presentó en las zonas de bosque y selva baja, así como en las áreas agrícolas (Figura 3), sin embargo, los valores bajos de cobertura encontrados en los dos primeros tipos de vegetación son debidos, en mayor parte, a la tala de especies leñosas, tanto para su utilización, como para la apertura de nuevas tierras al pastoreo. La menor cobertura vegetal se encontró en los pastizales, que se manifiesta comúnmente por la intercalación de áreas

de vegetación con suelo desnudo, como efecto del pastoreo de ganado bovino. Gutiérrez-Guzmán *et al.* (2015) encontraron porcentajes de cobertura vegetal de 15 a 40% en pastizales de La Cieneguilla, Durango.

Para validar los datos de cobertura vegetal se tomaron 20 puntos al azar en zona de pastizal, en los cuales se midió directamente el porcentaje de cobertura correspondiente a octubre del 2015 en una superficie circular de 2 m². Las mediciones de cobertura sobre el terreno, los valores estimados a partir de índices de vegetación, así como el error relativo entre estos se presentan en el Cuadro 1.

El error observado se atribuyó en parte a la diferencia entre el tamaño de celda de la imagen de satélite utilizada para el cálculo de NDVI y cobertura vegetal, y la superficie de muestreo en campo, por tanto, se aceptaron los valores estimados por el modelo.

Relieve. El intervalo de elevación fue de 1638 a 2285 m, con una altura media de 1817 m. Las geoformas que se observan fueron lomeríos muy accidentados y de difícil acceso, laderas de gran longitud y poca pendiente, hasta pequeñas planicies dedicadas a la agricultura en los márgenes de las corrientes.

Las pendientes dominantes en la cuenca fueron del orden de 15 a 30% de acuerdo al criterio de la FAO (2009), estas representaron el 34.20% de la superficie de la cuenca, en segundo lugar se encontraron las zonas con más de 30% de pendiente que ocuparon el 25.10% de la superficie y se localizaron en las partes más altas

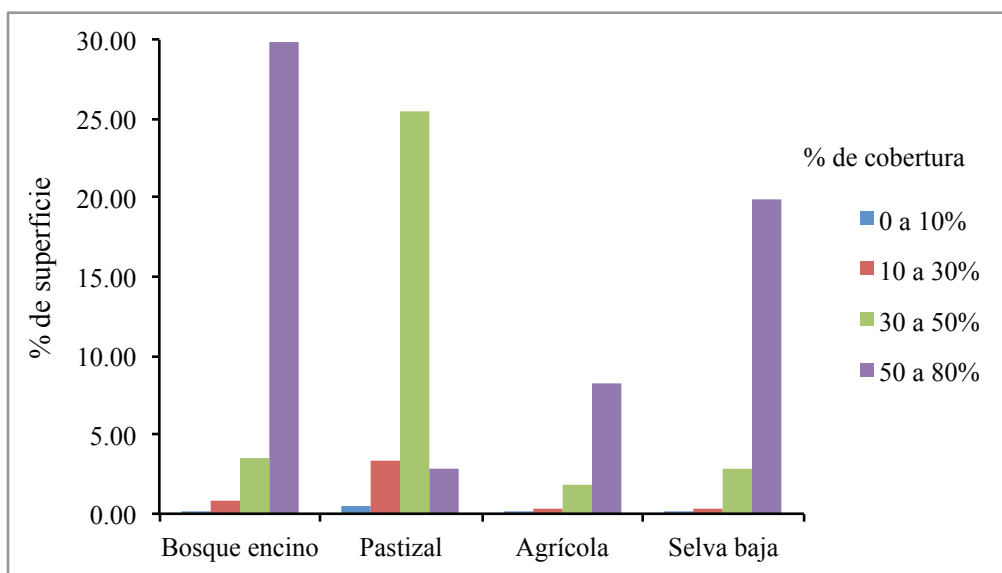


Figura 3. Porcentaje de cobertura vegetal por uso de suelo.

Cuadro 1. Comparación entre el porcentaje de cobertura vegetal medido y estimado.

Punto	Cobertura media	Cobertura estimada	Error
		----- % -----	
1	50.23	53.90	-6.81
2	50.77	53.90	-5.80
3	62.32	53.60	16.27
4	63.79	50.80	25.58
5	59.82	50.80	17.75
6	49.85	37.10	34.36
7	50.49	40.50	24.66
8	54.58	52.00	4.95
9	40.89	41.30	-0.99
10	43.06	59.40	-27.51
11	43.82	51.00	-14.08
12	49.03	50.50	-2.91
13	56.39	54.50	3.47
14	38.76	59.50	-34.85
15	43.82	58.90	-25.60
16	47.21	60.80	-22.35
17	35.57	59.40	-40.11
18	36.73	51.50	-28.68
19	36.53	50.20	-27.23
20	34.37	56.40	-39.05

de la cuenca (zona de lomeríos), las pendientes de 10 a 15% ocuparon el 14.50% del territorio, las zonas planas (0 a 10% de pendiente) representaron el 26.17 % del área total de la cuenca y se encontraron en las partes bajas, en las laderas suaves dedicadas al pastoreo y a la agricultura.

En la Figura 4 se presenta una clasificación de topoformas con base en el índice de posición topográfica (IPT) utilizando los criterios de Weiss (2001), valores positivos indican lugares más altos que la media de su entorno (crestas), valores negativos representan sitios más bajos que sus alrededores (valles) y valores cercanos a cero son áreas planas donde la pendiente es casi nula, o zonas de pendiente constante. Predominaron los cañones y las depresiones formadas por arroyos (IPT con valores menores a -5), así como las crestas y colinas propias de un paisaje accidentado (IPT mayor de 50), los valores de IPT cercanos a cero se localizaron en los valles y laderas de pendiente suave ocupados por pastizales.

Material parental. De acuerdo con la carta geológica de INEGI (1981) los tipos de materiales presentes en la cuenca fueron: Arenisca-Conglomerado que representó el 39.60% de la superficie, se encontró en la parte media y baja de la cuenca; y Andesita-Brecha volcánica que ocupó el 60.40% de la superficie total y se encontró en la parte alta y en la salida de la cuenca.

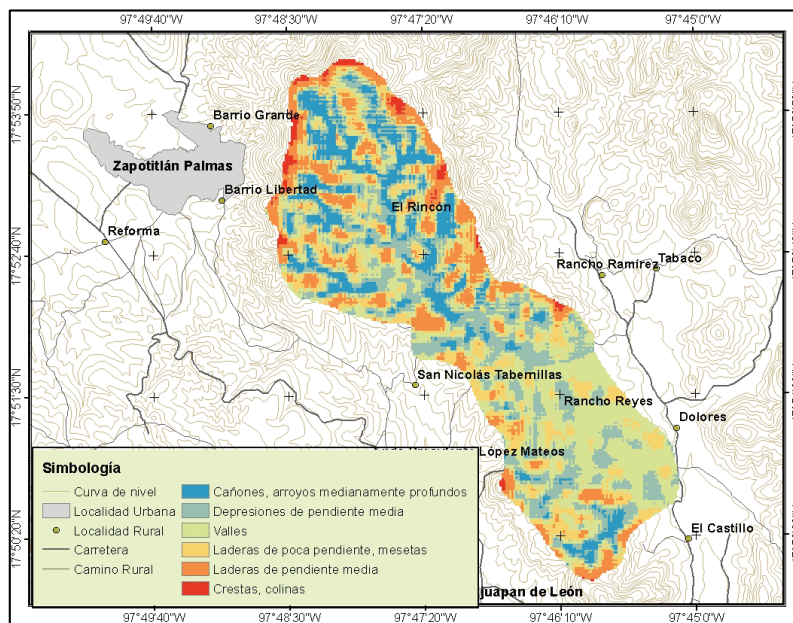


Figura 4. Clasificación de topoformas a partir del índice de posición topográfica (IPT).

Unidades de Suelos

Mediante el análisis de componentes principales (ACP) se redujo el número de elementos o parámetros que explican la mayor parte de la variabilidad. En el Cuadro 2 se observa que los primeros tres componentes poseen autovalores o *eigenvalores* mayores a uno y representaron el 99.69% de la variabilidad, los *eigenvalores* se relacionan con la varianza explicada por cada componente (León *et al.*, 2008) y permitieron determinar el número de componentes principales adecuado de acuerdo al criterio de Kaiser (Cuadras, 2007). El primer y segundo componentes explicaron el 81.90% de la varianza, la identificación y análisis de los pesos de las variables en estos es de gran ayuda al momento de definir las nuevas variables a utilizar.

El primer componente presentó los mayores pesos para las variables pendiente, IPT, material parental y uso de suelo, aunque estas últimas correlaciones son negativas. En el segundo componente se presentaron correlaciones positivas altas para material parental y pendiente, y negativas para las variables pendiente y uso de suelo (Cuadro 3).

La mayor variabilidad de los suelos de la cuenca rancho Dolores se puede explicar por los factores pendiente, IPT y material parental. Lo cual concuerda con lo reportado por Chinchilla *et al.* (2011), quienes afirman que, para su zona de estudio, los principales factores formadores de los suelos fueron el material parental y el relieve. Estos factores fueron considerados en nuestro estudio para la clasificación no supervisada de los tipos de suelo presentes en la cuenca, junto con el uso de suelo, ya que varios autores tales como Neris

Cuadro 2. Eigenvalores y varianza de los componentes principales.

Componente	Eigenvalor	Varianza	Varianza acumulada
		%	
1	301.000	57.587	57.587
2	127.000	24.313	81.901
3	92.900	17.790	99.691
4	0.965	0.184	99.876
5	0.350	0.067	99.943
6	0.246	0.047	99.990
7	0.050	0.0096	99.999
8	0.001	0.0003	100

Cuadro 3. Matriz de correlación entre las variables y los componentes principales.

Variable	Componente		
	1	2	3
Pendiente	0.1780	0.0532	-0.0039
IPT	-0.8220	-0.5380	0.0089
Material parental	-0.5390	0.8410	0.0067
Uso del suelo	-0.0398	-0.0216	0.0081
Cobertura vegetal	0.0135	0.0031	0.2400
NDVI	0.0097	-0.0030	0.1250
ITH	0.0077	-0.0009	0.9630
Precipitación	0.0001	-0.0001	-0.0024

IPT= índice de posición topográfica; NDVI = índice de vegetación de diferencia normalizada; ITH= índice topográfico de humedad.

et al. (2012), Arnhold *et al.* (2015) y Rubinić *et al.* (2015) coinciden en una alta relación de este factor con las propiedades físicas y químicas de los suelos. En regiones áridas y semiáridas, las diferencias en los suelos están asociadas con materiales de origen contrastantes, por lo que el factor material parental es muy importante, así como el relieve, los patrones locales de estos dos factores y sus relaciones con la vegetación, se pueden utilizar para predecir el tipo de suelo en áreas pequeñas (SSDS, 1993).

Se definieron cinco unidades de suelos con un total de diez polígonos (Figura 5). Se ubicaron diez sitios de muestreo distribuidos en las diferentes clases de suelo identificadas. Las características de las unidades y de las muestras de suelo se presentan en el Cuadro 4.

Las unidades de suelos fueron identificadas numéricamente para efectos demostrativos ya que no se obtuvieron datos suficientes para realizar una clasificación taxonómica de los suelos en la zona.

Los suelos de la unidad 1 corresponden a planicies agrícolas, tienen una profundidad media de 30 cm, se encuentran sobre los márgenes del cauce principal, y son producto de arrastre y depósito de material por acción del flujo superficial. Son de textura media, densidad aparente de 1.8 g cm⁻³, tienen una conductividad hidráulica de menos de 1 cm h⁻¹ que de acuerdo con Castellanos *et al.* (2000) se clasifica como muy baja, es un suelo moderadamente alcalino con un pH de 7.5 a 7.7, y el contenido de materia orgánica es bajo a moderadamente bajo 0.78 a 1.43 % (Castellanos *et al.*, 2000).

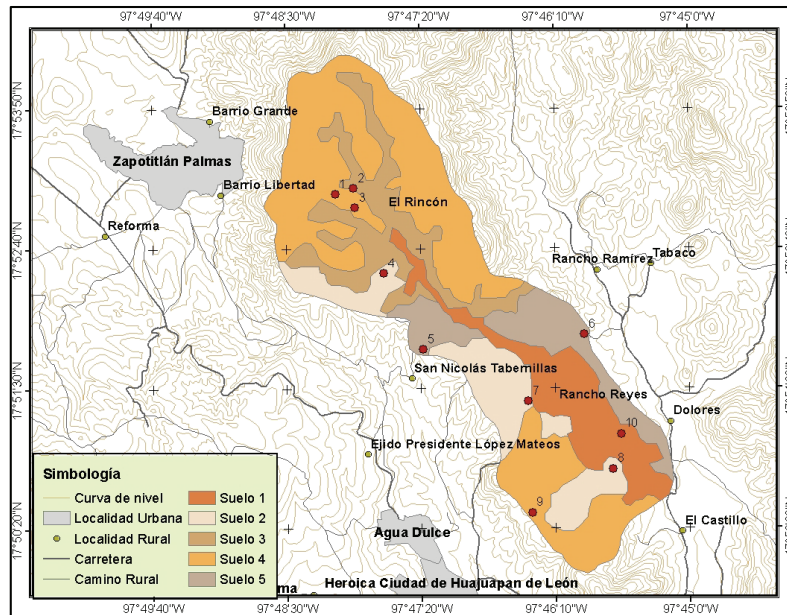


Figura 5. Unidades de suelo identificadas en la cuenca rancho Dolores y sitios de muestreo.

Los suelos identificados con el número dos corresponden principalmente a zonas de ladera con pendiente media en donde la vegetación predominante es la selva baja caducifolia, aquí se encuentran suelos someros de 10 cm hasta suelos poco profundos de 60 cm, de textura media y densidad aparente entre 1.27 y 1.62 g cm⁻³, tienen una conductividad hidráulica de moderadamente baja (2.78 cm h⁻¹) a alta (15.4 cm h⁻¹), ésta propiedad presenta la mayor variabilidad espacial y puede estar en función de la profundidad del perfil, la posición en el paisaje, la textura, e incluso de errores en la medición (Iqbal *et al.*, 2005), lo que explica el rango de valores encontrados. Estos suelos varían de neutros a moderadamente alcalinos y su contenido de materia orgánica es bajo (Castellanos *et al.*, 2000).

Los suelos de la unidad tres se encuentran principalmente en las depresiones cuya vegetación es bosque, presentan texturas de medias a finas con una profundidad media de 35 cm y densidad aparente de 1.3 g cm⁻³, su conductividad hidráulica es media a alta, el pH tiende a neutro y tienen alto y muy alto contenido de materia orgánica.

Los suelos de la unidad cuatro se localizan alrededor de las crestas y colinas, son poco profundos (menos de 40 cm) de textura media y densidad aparente entre 1.4 y 1.7 g cm⁻³, su conductividad hidráulica se encuentra entre 4 y 9 cm h⁻¹ clasificándose como media, su pH

es de neutro a moderadamente alcalino y tienen un contenido de materia orgánica de bajo a muy bajo de acuerdo con Castellanos *et al.* (2000).

Los suelos identificados con el número cinco se encuentran en las zonas de ladera de poca pendiente en donde el uso de suelo corresponde a pastizal, son de textura fina y profundidad variable (de 15 a 50 cm), tienen una densidad aparente que va de 1.36 a 1.55 g cm⁻³, su conductividad hidráulica es moderadamente alta en las zonas de mayor profundidad y baja en las de menor, tienen un pH neutro y contenido de materia orgánica de medio a alto.

Los coeficientes de correlación entre los factores de formación y las características del suelo se muestran en el Cuadro 5. La pendiente y el material parental tienen una alta relación con la textura del suelo, representada como la proporción de arcilla, así como con los parámetros de humedad, especialmente con el porcentaje de saturación, con una correlación arriba del 70%, esto concuerda con lo encontrado por Arnhold *et al.* (2015) que demostró que la topografía y el material parental controlan la distribución de la textura en el suelo en un transecto. Estos factores son los más importantes para explicar la variación de las características del suelo (Jenny, 1941), ya que la pendiente influye en el drenaje, acumulación y transporte de partículas de suelo (Hernández *et al.*, 2012), y el material parental

Cuadro 4. Características y propiedades de los suelos de la cuenca rancho Dolores.

Unidad de suelo	Sitio de muestreo	Prof	Arena	Limo	Arcilla	Clase textural	Dap	CC	PMP	Sat	Ks	pH	MO
		m	- - - - % - - - -				g cm ⁻³			%	cm h ⁻¹		%
1	10	0-0.13	36.61	43.51	19.88	Franco	1.81	25.7	14.7	43.6	0.89	7.57	1.43
		0.13-0.30	18.148	57.41	24.44	Migajón Limoso	1.86	29.1	17.3	47.8	0.35	7.73	0.78
2	4	0-0.25	49.358	33.04	17.6	Franco	1.27	21.4	13.6	29	7.5	7.69	0.39
		0.25-0.60	44.673	40.77	14.56	Franco	1.31	25.5	16.7	39.7	1.24	7.93	0.26
	7	0-0.20	40.117	28.92	30.96	Migajón Arcilloso	1.62	28.7	22.7	50.2	15.4	7.34	0.94
	8	0-0.10	16.912	72.45	10.64	Migajón Limoso	1.57	20.9	12.6	45	2.78	6.54	2.21
3	2	0-0.12	37.341	29.18	33.48	Migajón Arcilloso	1.3	40.6	34	76.9	12.4	6.74	7.48
		0.12-0.35	27.732	29.31	42.96	Arcilla	1.31	41.5	31.2	76.6	4.79	6.8	3.25
4	1	0-0.15	19.994	46.53	33.48	Migajón Arcillo Limoso	1.47	32.7	24.7	59.5	8.98	6.31	1.95
	3	0-0.20	53.006	25.35	21.64	Migajón Arcillo Arenoso	1.34	23.8	16.5	52.3	7.56	7.15	0.78
		0.20-0.40	45.368	36.11	18.52	Franco	1.76	26	16.1	49.4	1.83	7.87	0.52
	9	0-0.36	32.507	54.97	12.52	Migajón Limoso	1.69	21.3	13.1	44.2	4.02	6.47	1.95
5	5	0-0.30	4.804	85.92	9.28	Limo	1.36	20	13	47.5	8.63	7.04	3.9
	6	0.30-0.50	21.296	64.62	14.08	Migajón Limoso	1.42	22	13.7	45.8	3.54	7.3	2.21
		0-0.15	7.106	82.17	10.72	Limo	1.55	21.1	10.5	42.7	1.83	6.02	1.43

Prof = profundidad; % MO = porcentaje de materia orgánica; Dap = densidad aparente; PMP = punto de marchitez permanente; CC = capacidad de campo; % Sat = porcentaje de saturación; Ks = conductividad hidráulica saturada.

determina las variaciones en textura entre los horizontes de diagnóstico de los suelos (Encina-Rojas *et al.*, 2008; Badía *et al.*, 2013).

El IPT (parámetro utilizado para definir las geoformas) se relacionó con el contenido de materia orgánica, el pH y la profundidad, ya que de acuerdo con Zinck (2012) las propiedades físicas y químicas están controladas por los procesos de erosión y sedimentación que se presentan de acuerdo al tipo de geoforma. Las características del suelo dependen de la posición de éste en el relieve, la cual condiciona su espesor, drenaje, erosión y presencia de sales (Badía *et al.*, 2011).

El uso de suelo es un factor que tiene una importante influencia en las propiedades físicas y químicas de los suelos (Neris *et al.*, 2012; Sarker *et al.*, 2018), en este trabajo se encontraron altos coeficientes de correlación entre dicho factor y la profundidad del suelo, los parámetros de humedad (CC, PMP y porcentaje de

saturación) y pH; en concordancia con Rubinić *et al.* (2015), quienes concluyeron que la vegetación y uso del suelo tienen influencia en las propiedades de la capa superficial de los perfiles estudiados, principalmente estructura, contenido de humus y pH. El factor cobertura vegetal juega un papel importante en el suelo en el proceso de erosión al protegerlo del impacto de las gotas de lluvia, mejorar su estructura, incrementa la porosidad y la capacidad de infiltración, reduciendo el escurrimiento superficial y las pérdidas por arrastre (Pulido *et al.*, 2011), condicionando la profundidad del suelo.

La elaboración del mapa de suelos a partir de la interacción de los factores de formación de estos, permitió demostrar que existen diferentes tipos de suelo con propiedades físicas y químicas definidas, así como su distribución en la cuenca rancho Dolores, lo que puede contribuir a la definición de zonas de manejo agrícola, pecuario y forestal.

Cuadro 5. Coeficientes de correlación entre los factores de formación y propiedades de los suelos en la cuenca rancho Dolores.

Variabes	Pendiente	IPT	Material parental	Uso de suelo
Profundidad	0.073	0.325	0.142	0.618
Arcilla (%)	0.734	0.103	0.745	0.402
Dap	0.512	0.010	0.535	0.476
CC	0.650	0.278	0.705	0.517
PMP	0.697	0.225	0.741	0.523
Saturación (%)	0.724	0.145	0.792	0.714
Ks	0.609	0.067	0.612	0.363
pH	0.476	0.422	0.510	0.720
% MO	0.383	0.506	0.441	0.305

Dap = densidad aparente (g cm^{-3}); CC = capacidad de campo; PMP = punto de marchitez permanente; Ks = conductividad hidráulica saturada (cm h^{-1}); %MO = materia orgánica (%); IPT = índice de posición topográfica.

CONCLUSIONES

- De acuerdo con el análisis de componentes principales, los factores de formación de suelo que explicaron la variabilidad de éstos en la cuenca rancho Dolores son: relieve (pendiente, posición topográfica), material parental y vegetación.

- Se observó correlación entre los parámetros del relieve (geoformas y pendiente) y el material parental, con las propiedades de los suelos, específicamente textura, y parámetros de humedad (capacidad de campo, punto de marchitez permanente, porcentaje de saturación y conductividad hidráulica saturada).

- El uso de suelo y la vegetación influyeron en la profundidad del suelo, el pH y la porosidad total (% de saturación).

- El mapeo de suelos a partir del análisis integral de los factores formadores, permitió identificar unidades con diferentes propiedades físicas y químicas, y representar la distribución espacial de éstas, como una metodología alternativa que contribuya a la definición de zonas de manejo.

LITERATURA CITADA

- Abarca, O. y M. A. Bernabé Poveda. 2010. Estimación de la capacidad de uso de las tierras en el estado Aragua, Venezuela, mediante regresión logística multinomial. *Agron. Trop.* 60: 397-413.
- Al-Ghobari, H. M. 2011. The effect of irrigation water quality on soil properties under center pivot irrigation systems in central Saudi Arabia. *Trans. Ecol. Environ.* 145: 507-516. doi: 10.2495/WRM110441.
- Amundson, R. and H. Jenny. 1997. On a state factor model of ecosystems. *BioScience* 47: 536-543. doi: 10.2307/1313122.
- Arnhold, S., D. Otieno, J. Onyango, T. Koellner, B. Huwe, and J. Tenhunen. 2015. Soil properties along a gradient from hillslopes to the savanna plains in the Lambwe Valley, Kenya. *Soil Tillage Res.* 154: 75-83. doi: /10.1016/j.still.2015.06.021.
- Badía, D., C. Martí, and R. M. Poch. 2011. A soil toposquence characterization in the irrigable lands-protected area contact zone of El Basal, NE-Spain. *Arid Land Res. Manage.* 25: 1-18. doi: 10.1080/15324982.2010.528152.
- Badía, D., C. Martí, J. M. Aznar, and J. León. 2013. Influence of slope and parent rock on soil genesis and classification in semiarid mountainous environments. *Geoderma* 193-194: 13-21. doi: 10.1016/j.geoderma.2012.10.020.
- Bingfang, W., L. Miaomiao, Y. Changzhen, Z. Weifeng, and Y. Changzhen. 2004. Developing method of vegetation fraction estimation by remote sensing for soil loss equation: A case in the upper basin of Miyun Reservoir. *IEEE Conf. Geosci.Remote Sens.* 6: 4352-4355. doi: 10.1109/IGARSS.2004.1370101.
- Blake, G. R. 1965. Bulk density. pp. 374-390. *In*: C. A. Black (ed.). *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling.* Am. Soc. Agron. Madison, WI, USA.
- Blanco S., R. y J. M. Senciales G. 2001. La influencia de los factores formadores en las variaciones de las características y propiedades de los suelos de los Montes de Málaga. *Baetica Est. Art. Geogr. Hist.* 23: 9-24.
- Buol, S. W., R. J. Southard, R. C. Graham, and P. A. McDaniel. 2011. *Soil genesis and classification.* Wiley-Blackwell. Ames, IA, USA.
- Castellanos, J. Z., J. X. Uvalle-Bueno y A. Aguilar-Santelises. 2000. *Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas.* INCAPA. México, D. F.

- Chinchilla, M., A. Alvarado y R. Mata. 2011. Factores formadores y distribución de suelos de la subcuenca del río Pirrís, Talamanca, Costa Rica. *Agron. Costarricense* 35: 33-57.
- Colín García, G., D. S. Fernández Reynoso, M. R. Martínez Menez, J. D. Ríos Berber, P. Sánchez Guzmán, E. Rubio Granados y L. A. Ibáñez Castillo. 2017. Clasificación digital de suelos a través de covariables ambientales de la cuenca del río Mixteco. *Terra Latinoamericana* 35: 281-291.
- Cuadras, C. M. 2007. Nuevos métodos de análisis multivariante. CMC editions. Barcelona, España.
- Cueva, J. y L. A. Chalán. 2010. Cobertura vegetal y uso actual del suelo de la provincia de Loja. Depto. de sistemas de información geográfica de naturaleza y cultura internacional. Gráficas Amazonas. Loja, Ecuador.
- Day, P. R. 1965. Particle fractionation and particle-size analysis. pp. 545-566. *In*: C. A. Black (ed.). *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling.* Am. Soc. Agron. Madison, WI, USA.
- Deng, Y., J. P. Wilson, and B. O. Bauer. 2007. DEM resolution dependencies of terrain attributes across a landscape. *Int. J. Geogr. Infor. Sci.* 21:187-213. doi: 10.1080/13658810600894364.
- Domingo-Santos, J. M., E. Corral Pazos P., F. Ruiz-Fernández, R. Fernández de Villarán y F. R. Redondo-Salguero. 2013. Cuantificación de la influencia del índice de humedad en la profundidad y capacidad hídrica del suelo. pp. 2-9. *In*: 6º Congreso Forestal Español. 10-14 Junio 2013. Sociedad Española de Ciencias Forestales. Vitoria-Gasteiz, España. ISBN: 978-84-937964-9-5
- Dudal, R. 2004. The sixth factor of soil formation. pp. 1-13. *In*: *Proceedings of International Conference on Soil Classification 2004.* Petrozavodsk, Russia.
- Encina Rojas, A., J. E. E. Ibarra y H. Moreno. 2008. Relación entre materiales geológicos y las propiedades físicas y químicas de los suelos. *Invest. Agrar.* 10: 59-64.
- Evans, C. R. W., M. Krzic, K. Broersma, and D. J. Thompsom. 2012. Long-term grazing effects on grassland soil properties in southern British Columbia. *Can. J. Soil Sci.* 92: 685-693. doi: 10.4141/cjss2011-070.
- FAO (Food and Agriculture Organization). 2009. Guía para la descripción de suelos. FAO. Roma, Italia.
- García E. 1981. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía UNAM. México, D. F.
- Gardner, W. H. 1965. Water content. pp. 82-127. *In*: C. A. Black (ed.). *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling.* Am. Soc. Agron. Madison, WI, USA.
- Gutiérrez- Guzmán, U. N., E. Castellanos-Pérez, J. J. Quiñones-Vera, J. S. Serrato-Corona, J. J. Martínez-Ríos, I. Orón-Castillo e I. Chairez-Hernández. 2015. Cobertura vegetal estimada por fotografías digitales relacionada con la biomasa en un sitio de pastizal del norte de México. *Rev. Int. Bot. Exp.* 84: 312-318.
- Hernández M., R., J. C. González C., A. Cabrera G. y M. S. Rosas M. 2012. Influencia del relieve en las propiedades físicas y químicas de suelos agrícolas adyacentes al río Lerma. *Biológicas* 14: 23-29.
- IICA (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura). 2016. Buenas prácticas en la elaboración de mapas de suelo. San José. C.R. ISBN: 978-92-9248-617-4.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 1981. Conjunto de datos vectoriales geológicos. Escala 1:250 000. Serie I. Oaxaca. INEGI. Dirección General de Geografía. Aguascalientes, Ags., México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2004. Conjunto de datos vectoriales edafológicos. Escala 1:250 000. Serie II. Oaxaca. INEGI. Dirección General de Geografía. Aguascalientes, Ags., México.
- IMT (Instituto Mexicano del Transporte). 1998. Génesis, identificación y uso de los suelos en México: distribución, propiedades, clasificación y manejo de suelos residuales y transportados con aplicaciones a la ingeniería civil. Documento técnico No. 19. Sanfandila, Querétaro.
- Iqbal, J., J. A. Thomasson, J. N. Jenkins, P. R. Owens, and F. D. Whisler. 2005. Spatial variability analysis of soil physical properties of alluvial soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69: 1-14.
- IUSS Grupo de Trabajo WRB. 2007. Base referencial mundial del recurso suelo. Primera actualización 2007. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. FAO. Roma.
- Jenny, H. 1941. *Factors of soil formation: A system of quantitative pedology.* Dover Publications. New York, NY, USA. ISBN: 0-486-68128-9.
- Klute, A. and C. Dirksen. 1986. Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods. pp. 687-732. *In*: A. Klute (ed.). *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogy methods.* Agronomy monograph no. 9. ASA-SSSA. Madison, WI, USA.
- León G., A., H. Llinás S. y J. Tilano. 2008. Análisis multivariado aplicando componentes principales al caso de los desplazados. *Ing. Des.* 23: 119-142.
- Mora M., M. A., L. Ríos P., L. Ríos R. y A. Charry. 2017. Impacto de la actividad ganadera sobre el suelo en Colombia. *Ing. Reg.* 17: 1-12. doi: 10.25054/issn.2216-1325.
- Muñoz Iniestra, D. J., F. López G., M. Hernández M., A. Soler A. y J. López G. 2009. Impacto de la pérdida de la vegetación sobre las propiedades de un suelo aluvial. *Terra Latinoamericana* 27: 237-246.
- Neris, J., C. Jiménez, J. Fuentes, G. Morillas, and M. Tejedor. 2012. Vegetation and land use effects on soil properties and water infiltration of andisols in Tenerife (Canarian Islands, Spain). *Catena* 98: 55-62. doi: 10.1016/j.catena.2012.06.006.
- Norma Oficial Mexicana (NOM-023-RECNAT-2001). 2001. Que establece las especificaciones técnicas que deberá contener la cartografía y la clasificación para la elaboración de los inventarios de suelos. Diario Oficial. SEMARNAT. México, D. F.
- Phillips, J. D. 1998. On the relations between complex systems and the factorial model of soil formation. *Geoderma* 86: 1-21. doi: 10.1016/S0016-7061(98)00054-8.
- Pulido-Fernández, M., J. F. Lavado-Contador y S. Schnabel. 2011. Estimación de la cobertura del suelo para estudios de degradación. Influencia de la escala espacial y la técnica de muestreo. *Nimbus* 27-28: 169-181.
- Rascón A., E., E. Peña C., R. López R., M. Cantú S. y E. Narro F. 2008. Impacto en algunas propiedades físicas del suelo por aplicación de aguas residuales. *Terra Latinoamericana* 26: 69-74.

- Richards, L. A. 1949. Methods of measuring soil moisture tension. *Soil Sci.* 68: 95-112.
- Roa-Lobo, J. G. y U. Kamp. 2012. Uso del índice topográfico de humedad (ITH) para el diagnóstico de la amenaza por desborde fluvial, Trujillo-Venezuela. *Rev. Geográf. Venezolana* 53: 109-126.
- Rouse, J. W, R. H. Haas, J. A. Scheel, and D. W. Deering. 1974. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. pp. 309-317. *In*: S. C. Freden, E. P. Mercanti, and M. A. Becker (comp.). *Third earth resources technology satellite-1 Symposium*. Vol. 1: Technical Presentations, section A. Washington, DC, USA.
- Rubinić, V., M. Pejić, I. Vukoje, and A. Bensa. 2015. Influence of geomorphology and land use on soil formation – case study Maksimir (Zagreb, Croatia). *Agric. Conspec. Scientif.* 80:1-8.
- Sarker, K. R., M. J. A. Mian, S. C. Barman, and M. A. Kader. 2018. Effects of land use on soil properties. *Int. J. Nat. Soc. Sci.* 5: 7-14.
- Soriano Soto, M. D., A. Calvo C., C. Boix y V. Pons. 1996. Variaciones en las propiedades de los suelos y su agregación en un transecto altitudinal de la provincia de Alicante. *Cuater. Geomorfol.* 10: 45-58.
- SSDS (Soil Science Division Staff). 1993. *Soil survey manual*. USDA handbook 18. Government printing office. Washington, DC, USA.
- Walkley, A. and A. Black. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37: 29-38.
- Weiss, A. D. 2001. Topographic position and landforms analysis. The Nature Conservancy. Poster presentation, ESRI user conference. San Diego, CA, USA.
- Zapata H., R. D., 2002. *Química de los procesos pedogenéticos del suelo*. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia.
- Zinck, J. A. 2012. *Geopedología: Elementos de geomorfología para estudios de suelos y de riesgos naturales*. ITC. Enschede, Netherlands. ISBN: 90-6164-339-2.