



**EDUCACIÓN**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO®

Instituto Tecnológico de Tlajomulco



TESIS

**DISTRIBUCIÓN Y VARIABILIDAD ESPACIAL DEL pH Y  
MATERIA ORGÁNICA DE LOS SUELOS DE TLAJOMULCO  
DE ZÚÑIGA, JALISCO, MÉXICO**

QUE PRESENTA:

**ING. RAÚL MEDINA GONZÁLEZ**

DIRECTOR DE TESIS:

**DR. MIGUEL ÁNGEL SEGURA CASTRUITA**

---

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROBIOTECNOLOGÍA**

---

TLAJOMULCO DE ZÚÑIGA, JALISCO. JUNIO, 2022.



Instituto Tecnológico de Tlajomulco  
Subdirección Académica  
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Tlajomulco de Zúñiga, Jal. **13/junio/2022**  
No. DE OFICIO: DEPI/081/2022

Asunto: Autorización de impresión de tesis.

**RAÚL MEDINA GONZÁLEZ (M07940053)  
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRÍA  
EN CIENCIAS EN AGROBIOTECNOLOGÍA  
PRESENTE**

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado "DISTRIBUCIÓN Y VARIABILIDAD ESPACIAL DEL pH Y LA MATERIA ORGÁNICA DE LOS SUELOS DE TLAJOMULCO DE ZÚÑIGA, JALISCO, MÉXICO", ha informado a esta División de Estudios de Posgrado e Investigación (DEPI), que están de acuerdo con el trabajo presentado.

Por lo anterior, se le **AUTORIZA** a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

**ATENTAMENTE**

Excelencia en Educación Tecnológica®  
Educando para la Sociedad Actual y los Retos del Futuro

  
**PEDRO YESCAS CORONADO  
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS  
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN DEL ITT**



S.E.P  
TECNM  
14DIT0003B  
IT TLAJOMULCO  
DIV. DE ESTUDIOS  
DE POSGRADO  
E INVESTIGACIÓN

ccp.- Luz Elena Alfaro Orozco; Departamento de Servicios Escolares  
Expediente  
MIBR/AIBR/PYC/cm<sup>2</sup>.



Km. 10 Carretera Tlajomulco-San Miguel Cuyutlán Tlajomulco de Zúñiga Jalisco.  
Código Postal 45640, Teís. 3329021130 al 37 [tecnm.mx](http://tecnm.mx) | [www.tlajomulco.tecnm.mx](http://www.tlajomulco.tecnm.mx)



**2022** Ricardo Flores  
Año de Magón  
FUNDACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA

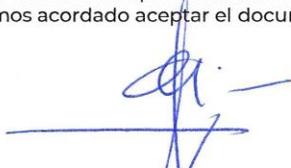
## ACEPTACIÓN DE PROPUESTA DE TESIS

Tlajomulco de Zúñiga, Jal., 03 de junio del 2022.

**PEDRO YESCAS CORONADO**  
**JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS**  
**DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN DEL ITT**  
**PRESENTE**

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial del C. RAÚL MEDINA GONZÁLEZ, con número de control M07940053, de la Maestría en Ciencias en Agrobiotecnología (MCAGB2011-19), le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis profesional titulado: "DISTRIBUCIÓN Y VARIABILIDAD ESPACIAL DEL pH Y LA MATERIA ORGÁNICA DE LOS SUELOS DE TLAJOMULCO DE ZÚÑIGA, JALISCO, MÉXICO"

Y hemos encontrado que se han realizado todas las correcciones y observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.



Miguel Ángel Segura Castruita  
Doctor en Ciencias  
5296234  
Director



Arturo Moisés Chávez Rodríguez  
Doctor en Ciencias Químicas  
7990496  
Revisor



Osvaldo Amador Camacho  
Maestro en Ciencias en Agrobiotecnología  
8579035  
Revisor



Km. 10 Carretera Tlajomulco-San Miguel Cuyutlán Tlajomulco de Zúñiga Jalisco.  
Código Postal 45640, Tels. 3329021130 al 37 [tecnm.mx](http://tecnm.mx) | [www.tlajomulco.tecnm.mx](http://www.tlajomulco.tecnm.mx)



## **Dedicatoria.**

A mis padres Raúl Medina Michel y Marcelina González Pelayo por su gran apoyo, su amor, confianza y comprensión que me dan la motivación para que me supere día a día, por darme lo necesario para salir adelante y por estar al pendiente de mí a lo largo de mi vida.

A mis hermanos Oscar, Alejandra y Pedro que no dejaron de creer en mí y darme ánimos junto con muchos momentos hermosos compartidos que siempre vivirán dentro de mí y alegran los días de mi vida.

A mi amada esposa María Verónica Mardueño Aguilar quien siempre estuvo a mi lado alentándome, dándome ánimos, apoyándome incondicionalmente a concluir este camino y llegar a la deseada meta, gracias porque estuviste, estas y estarás conmigo apoyándome como siempre.

## **Agradecimientos**

Primero a mi Dios que me ha dado salud, paz y armonía para llegar a la meta.

Al Instituto Tecnológico de Tlajomulco Jalisco por brindarme la oportunidad y abrirme las puertas para seguirme preparando y ser parte de dicha Institución.

Gracias al Doctor Miguel Ángel Segura Castruita y al Maestro en Ciencias Osvaldo Amador Camacho por brindarme su apoyo y conocimiento e instruirme en mi trabajo.

Al Doctor Juan Florencio Gómez Leyva y a las personas del laboratorio de biología molecular gracias porque cuando ocupe algún espacio u material nunca me lo negaron siempre me trataron excelentemente bien.

Al equipo de futbol indestructibles compuesto por doctores, maestros y personal del ITTJ junto con alumnos del posgrado, a todos ellos gracias por hacerme parte del equipo con quienes pase innumerables tardes muy bonitas jugando al futbol y llevando muy hermosa amistad con todos ellos bellos momentos que se quedan bien guardados en corazón.

A los Doctores y Profesores que me apoyaron cuando se les requirió.

Al personal en general del ITTJ que siempre me trataron con todo el gusto que se merece uno de alumno al ir a preguntar cualesquiera dudas.

A mis compañeros del posgrado, jóvenes y alumnos del ITTJ con quienes pase hermosos momentos que me los llevo guardados en el corazón.

Mi agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico que me brindo y así llevar acabo mi estudio de maestría.

## Contenido

1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1 Suelo .....	3
2.2. Acidez de los suelos .....	7
2.3. Materia orgánica de los suelos.....	12
2.4. La geoestadística en la interpolación espacial de datos .....	20
<i>Técnicas geoestadísticas en la interpolación</i> .....	20
3. HIPÓTESIS.....	24
4. OBJETIVO .....	24
4.1.-Objetivos particulares .....	24
5. MATERIALES Y MÉTODOS .....	25
6. Resultados y discusiones.....	32
6.1. Características de físicas y químicas de los suelos .....	32
6.2 Estructura espacial de pH y MO .....	33
6.3 Distribución espacial del pH y MO .....	36
6.4 Verificación de los mapas de pH y MO .....	39
7. Conclusiones .....	41
8.- Bibliografía.....	42

## Índice de Cuadros

Cuadro 1.- . Estadísticas descriptivas de algunas características y propiedades de los suelos del municipio de Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco .....	32
Cuadro 2.- . Dependencia espacial y variación espacial de las variables pH y MO .....	34
Cuadro 3.- Validación cruzada. ....	35
Cuadro 4.- Precisión de los mapas de pH y MO del municipio de Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco .....	40

## Índice de Figuras

Figura 1.- Génesis del suelo .....	5
Figura 2.- medición del pH en dilución suelo. agua .....	8
Figura 3.- Disponibilidad de compuestos químicos a diferentes niveles de pH.....	9
Figura 4.- Distribución de suelos ácidos a nivel mundial .....	10
Figura 5.- Distribución de suelos ácidos en México. ....	11
Figura 6.- Localización del área de estudio .....	25
Figura 7.- Geología del municipio de Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco .....	26
Figura 8.- Climograma del municipio de Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco. ....	27
Figura 9.- Semivariogramas de: a) acidez activa y b) porcentajes de MO .....	33
Figura 10.- Mapas temáticos de: a) acidez activa y b) porcentaje de MO.....	37
Figura 11.- Perfiles topográficos del municipio de Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco.	38

# 1. INTRODUCCIÓN

El aumento gradual de la acidez, en suelos agrícolas con uso intensivo y sin control, influye notablemente en la disponibilidad de algunos elementos esenciales y en la toxicidad de otros (Benton, 2003). La acidez de los suelos agrícolas está directamente relacionada con la actividad de los iones hidrógeno ( $H^+$ ) presentes en la solución del suelo, generalmente se mide en valores de pH en agua (1:2), a lo que se conoce como acidez activa (Dewis y Freitas, 1970).

La variación en las características y propiedades del suelo como la acidez, puede deberse a diferencias regionales, como son clima, topografía y material parental (Ibarra-Castillo *et al.*, 2009) e incluso locales en función de los contenidos de materia orgánica (MO) (Bautista-Cruz *et al.*, 2005) y el manejo del suelo (Zarazúa-Villaseñor *et al.*, 2017).

La acumulación de MO en el suelo influye sobre el pH de los suelos (Weil y Brady, 2017); aunque, se ha reportado que la propia acidez de los suelos puede afectar la velocidad de alteración de la MO (Frey *et al.*, 2014). No obstante, en la práctica parece darse por hecho que, en superficies reducidas, la heterogeneidad no es relevante, por lo que, con frecuencia, se considera que parcelas de 4 a 5 ha son "aparentemente" homogéneas; sin embargo, éstas podrían no serlo, debido a la influencia del manejo e incluso por las características propias de la génesis de los suelos como es el caso de la acidez.

Por ser el suelo un cuerpo dinámico, existe cierta heterogeneidad en el mismo y habría que determinar el origen de esta variación y si es suficientemente significativa; de serlo, podría afirmarse que dentro de estas áreas existen condiciones que demandan un manejo diferente por la distribución espacial de la acidez del suelo (Zarazúa-Villaseñor *et al.*, 2007).

La evaluación de la distribución espacial es posible cuando se recurre a técnicas geoestadísticas, ya que permiten conocer e interpretar el comportamiento de las variables del suelo a través del espacio (Malone *et al.*, 2017). Para estos fines,

desde la visión de la geoestadística, la existencia de datos de suelo con autocorrelación espacial es importante (Garbanzo-León *et al.*, 2017). La aplicación de la geoestadística para el análisis de la estructura espacial de observaciones (variación de valores en función de distancias entre ellas), facilita la interpretación espacio temporal de variables de estudio en una región dada (Peña, 2006). Dentro de la geoestadística existen diferentes métodos geoestadísticos para realizar estimaciones espaciales; siendo uno de los más utilizados el método Kriging Ordinario (KO). La eficacia de KO para predecir el comportamiento espacial de características químicas de suelos, en comparación con otros métodos de interpolación, ha sido demostrada (Villatoro *et al.*, 2008; Alemán-Montes *et al.*, 2019).

Lo anterior permite suponer que al estudiarse la acidez activa (pH en agua, 1:2) de los suelos mediante técnicas geoestadísticas, permitirá conocer su variabilidad y distribución espacial, así como identificar los posibles factores que influyen en ésta.

## 2. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1 Suelo

El suelo se forma por la interacción de los sistemas atmósfera, hidrosfera y biosfera sobre la superficie de la geosfera; la meteorización química y mecánica de las rocas y la influencia de ciertos procesos microbiológicos producen el suelo. La interacción con el Hombre, un componente singular de la biosfera, puede romper también el equilibrio, debido a su uso de la agricultura, industria, minería y ganadería (Galán y Romero, 2008).

El suelo es el componente del medio ambiente que ha sufrido mayor deterioro respecto a los factores agua y aire. Constituye la parte superficial de la tierra y tiene marcada importancia en la vida del hombre, animales y plantas porque proporciona los alimentos y sustento para la supervivencia. Su contaminación ocurre por los aportes de materia orgánica e inorgánica que rompen el equilibrio normal entre el medio físico, químico y biológico, compatible con la vida (Nápoles *et al.*, 2005).

La ciencia del suelo es una ciencia holística, donde concurren la biología, la química, la geología, la física y otras disciplinas aplicadas como las ingenierías de la producción, que procuran enfrentar los desafíos del mundo moderno en la gestión del recurso suelo (Churchman, 2010; Brevik *et al.*, 2015).

El suelo, junto con el agua, ha sido y es uno de los recursos fundamentales para el desarrollo y manutención de la vida sobre la tierra. Aparte de ser la base para la producción de los alimentos requeridos por la creciente población mundial, el suelo es el componente principal de los ecosistemas, como soporte de una amplia y numerosa gama de seres vivos y como regulador del recurso agua (López *et al.*, 2014). Es un elemento fundamental para la agricultura por proveer de agua y

nutrientes a los cultivos; además, interviene en los ciclos del agua, carbono, nitrógeno, fósforo y otros elementos de interés (Ferrerías *et al.*, 2015).

Bouma *et al.* (2012) lo definen como un sistema dinámico multifuncional resultado de las interacciones de factores bióticos y abióticos sobre un material parental con la capacidad de ofertar bienes y servicio.

Históricamente, la ciencia del suelo se ha relacionado con la agricultura, lo que ha permitido cambios significativos en el aumento y eficiencia de la producción de alimentos (Hartemink y McBratney, 2008). Al mismo tiempo, el suelo se consideraba con capacidad ilimitada para asimilar contaminantes sin causar efectos nocivos inmediatos sobre el ambiente (Gutiérrez *et al.*, 2016). Sin embargo, a mediados de la década de los 80s, el estudio de los suelos se enfocó en temas como el cambio climático, regulación de los recursos naturales y en servicios ecosistémicos (Tinker, 1985; Bridges y Catizzone, 1996), demostrando así la función fundamental del suelo frente a las problemáticas ambientales actuales (Herrick, 2000), aunque los suelos nunca han sido el foco específico de un acuerdo ambiental multilateral (Keesstra *et al.*, 2016).

El suelo es un medio biofísico heterogéneo y complicado de describir (FAO, 2009). Los primeros investigadores de las ciencias del suelo propusieron cavar una fosa y en una de las paredes a la que denominaron perfil se delimitaron las capas u horizontes basados en propiedades observadas en el campo (Zhang y Hartemink, 2018). Estas propiedades generalmente incluyen color, textura y estructura (Grauer-Gray y Hartemink, 2018).

Después de la delineación del horizonte, se toma una muestra de suelo del horizonte para el análisis de laboratorio; como resultado, solo se mide la variación vertical de un perfil de suelo, la cual es usualmente confusa a medida que aumenta en profundidad. Sin embargo, con el muestreo tradicional se asume que el valor del horizonte es un atributo particular que lo distingue de los demás horizontes (Malone, *et al.*, 2009). Estos se diferencian del material original o parental debido a procesos formadores de adición, pérdida, translocación y transformación (Figura 1). Gracias a esta transformación, el suelo es capaz de soportar el crecimiento de las plantas

en el medio natural, así como de realizar diversas funciones ecosistémicas y aprovechamientos antrópicos, siendo su variabilidad función de los factores formadores de acuerdo con la ecuación de Jenny:

$$Suelo (S) = f[(cl, g, p, t, b) + (m)]$$

Dónde: cl= clima; g=geomorfología; p= material parental; t= tiempo; b= factor biótico (fauna y vegetación) y m= factor antrópico.

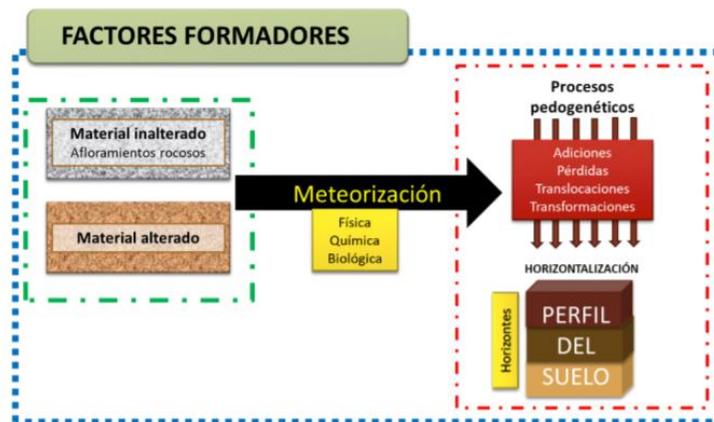


Figura 1. Génesis del suelo

En un perfil del suelo, lo más reconocible a simple vista son los HORIZONTES: capas habitualmente horizontales a la superficie del suelo y que presentan unas características físicas y químicas diferenciadas del resto de capas dentro del mismo perfil del suelo, dando lugar a un “perfil bandeado o a capas” Para la distinción de las capas u horizontes, se pueden utilizar variables tanto físicas como químicas. El color, por ejemplo, es una de las principales características que permiten identificar los diferentes horizontes del perfil (WRB, 2015.)

La Clasificación de Suelos se refiere a la agrupación con un rango de propiedades similares (químicas, físicas y biológicas) a unidades que puedan ser geo-referenciadas y mapeadas. De hecho, los suelos se consideran como un recurso natural mucho más complejo que otros elementos como el aire y el agua.

Los suelos por su naturaleza contienen elementos químicos y simultáneamente se combinan entre fases sólidas, líquidas y gaseosas. Además, el número de características físicas, químicas y biológicas y sus combinaciones llegan a ser casi infinitas. Asimismo, no es de extrañar las varias propuestas y esquemas distintos para armonizar y correlacionar los tipos de suelo diferentes.

La industrialización, globalización y el crecimiento demográfico ha ocasionado la expansión de la frontera agrícola, utilizándose más espacio de suelo para dicha actividad, provocando deterioro en sus propiedades físicas, químicas y biológicas naturales, conduciendo a una degradación paulatina (FAO, 2016).

La degradación del suelo se ha convertido en una de las mayores preocupaciones actuales, debido a su importancia para la preservación de la vida (García *et al.* 2010). El origen de esta problemática ambiental se ha asociado principalmente a la actividad agraria de tipo industrial, pues ésta involucra prácticas como el uso irracional de insumos químicos externos, el empleo de maquinaria pesada, los monocultivos, el sobrepastoreo, y la sobreexplotación de recursos hídricos, las cuales impactan de manera negativa al suelo (Ferrerías *et al.*, 2007).

Para la FAO-UNESCO, la degradación del suelo es un proceso que disminuye la capacidad actual y potencial del suelo para producir cuantitativa y cualitativamente, bienes y servicios, por acciones directas de origen antrópicas relacionadas con el manejo de agroquímicos y riego en la agricultura, forestería, ganadería, y por acciones indirectas relacionadas con actividades industriales, eliminación de residuos y transporte entre otras (Brissio y Savini, 2005). Se reconocen tres tipos de degradación del suelo: física, química y biológica (FAO, 2011).

La degradación física del suelo inhabilita el funcionamiento adecuado del suelo, debido a que afecta su capacidad de transmisión de fluidos, el volumen de almacenaje relacionado con el balance de gases y agua necesario para disolver los nutrientes para las plantas (Muñoz *et al.*, 2013).

Los agregados del suelo son unidades estructurales estables de partículas del suelo enlazadas, resultado de varios procesos físicos, químicos y biológicos. Se clasifican

por el tamaño en macro agregados (mayor a 250  $\mu\text{m}$ ) y micro agregados que son menores a 205  $\mu\text{m}$  (Jiménez *et al.*, 2019). Los agregados son importantes para la conservación de la porosidad del suelo y la provisión de su estabilidad frente a problemas de erosión (Morell *et al.*, 2009).

La degradación del suelo se define como un cambio en la salud del suelo resultado en una disminución de la capacidad del ecosistema para producir bienes o prestar servicios para sus beneficiarios. Los suelos degradados contienen un estado de salud que no pueden proporcionar los bienes y servicios normales del suelo en cuestión en su ecosistema (Moreira *et al.*, 2019).

Uno de los problemas más agudos que ha experimentado la agricultura y que no lo apreciamos claramente aún, es el deterioro de la calidad del suelo (Moreira *et al.*, 2019).

## **2.2. Acidez de los suelos**

La acidez es considerada como una elevada cantidad de hidrogeno en una solución acuosa (*RAE.*), Sin embargo, para poder definir la acidez del suelo se considera que son grandes cantidades de hidronio, lo que provoca la acidez del mismo, también influyen diferentes factores como el relieve, la flora, la fauna y el clima a lo largo del tiempo, material de conformación de la roca madre y ubicación geográfica, mejor conocida como acidez natural, sin embargo, también puede que cambie la acidez por causas antrópicas. Para poder determinar que un suelo es acido se tiene que medir a través del pH el cual mide la concentración de hidrogeno presente en una solución acuosa. para poder determinar que un suelo es acido debe de permanecer por debajo de 5.5 pH (*Suelos Ácidos Portal de Suelos de La FAO.*) (Figura 2). Los suelos ácidos son dependientes en gran parte por los coloides (arcilla, materia orgánica, óxidos e hidróxidos de Fe y Al) (Cremona y Enriquez 2020).

pH	Clasificación
<4,5	extremadamente ácido
4,6-5,0	muy fuertemente ácido
5,1-5,5	fuertemente ácido
5,6-6,0	moderadamente ácido
6,1-6,5	levemente ácido
6,6-6,9	muy levemente ácido
7	Neutro
7,1-7,3	muy levemente alcalino
7,4-7,8	levemente alcalino
7,9-8,4	moderadamente alcalino
8,5-9,0	fuertemente alcalino
>9,0	muy fuertemente alcalino

Figura 2. Medición del pH en dilución suelo. agua (Cremona y Enriquez 2020)

La presencia de acidez en el suelo está dada por la presencia de  $Al^{3+}$  y  $Mn^{2+}$ , los cuales se presentan también por diferentes factores como son el intercambio de cationes alcalinos por cationes ácidos, causados por las lluvias, “*la descomposición de la materia orgánica, la oxidación del azufre, la nitrificación del amonio- $NH_4^+$  y la liberación de  $H^+$  a través de las raíces cuando absorben  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  y  $K^+$* ” sin embargo la implementación de fertilizantes nitrogenados también son causantes de la acidificación del suelo, provocando esto la toxicidad del mismo para los diferentes cultivos (Cenicafe, 2016).

Los suelos pueden transformarse en suelos ácidos dado por el intercambio de cationes básicos por ácidos (algunos de estos pueden ser hidrogeno principalmente y aluminio), algunos factores que conllevan a este problema es el lavado de los suelos este se da en zonas tropicales al exceder la humedad las bases como son el  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  y  $K^+$  se lixivian o se lavan hacia capas inferiores, aumento de materia orgánica esta cuando está en él proceso de descomposición hace un pH ácido,

exposición a compuestos ácidos, los tipos de fertilización que se utilizan en la agricultura a base de amoniaco etc. La acidez del suelo medida en agua se divide en seis categorías Figura 2 (Videla, 2012; Cremona y Enríquez 2020).

El pH óptimo de los suelos agrícolas debe variar entre 6.5 y 7.0 para obtener los mejores rendimientos y la mayor productividad (Prasad and Power, 1997). El pH de un suelo ácido se puede mejorar gradualmente mediante el manejo apropiado y con aplicación de cal (Prasad and Power, 1997; Havlin *et al.*, 2005). El pH del suelo influye en la disponibilidad de los nutrientes para las plantas, es decir, este factor puede ser la causa de que se presente deficiencia, toxicidad o que los elementos no se encuentren en niveles adecuados (Benton, 2003). Por otra parte, valores extremos del pH pueden afectar la estructura del suelo (Edward, 2000).

La acidez del suelo puede llegar a inhibir o aumentar la disponibilidad de los diferentes nutrientes encontrados en el suelo Figura 3 (Videla, 2012).

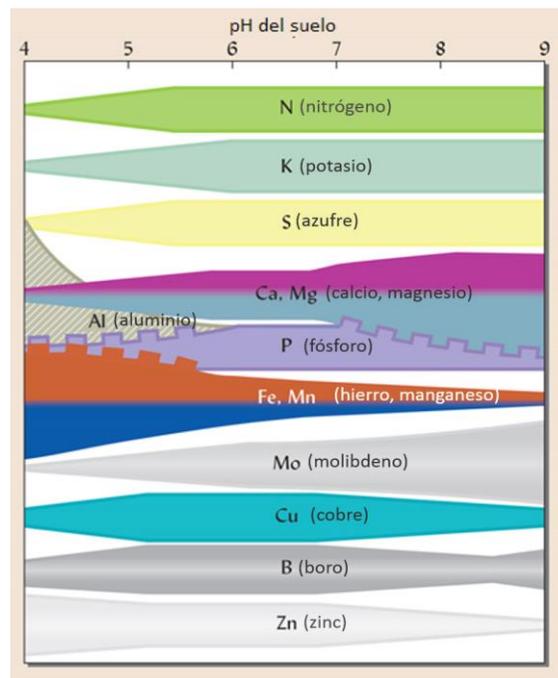


Figura 3. Disponibilidad de compuestos químicos a diferentes niveles de pH (Cremona y Enríquez, 2020).



Mientras que, dentro del territorio nacional se encuentra de una forma muy distribuida; sin embargo, en el estado de Jalisco predominan suelos de 6.1-6.5, encontrándose también suelos oscilantes de 4.5-5.5 (Figura 5).

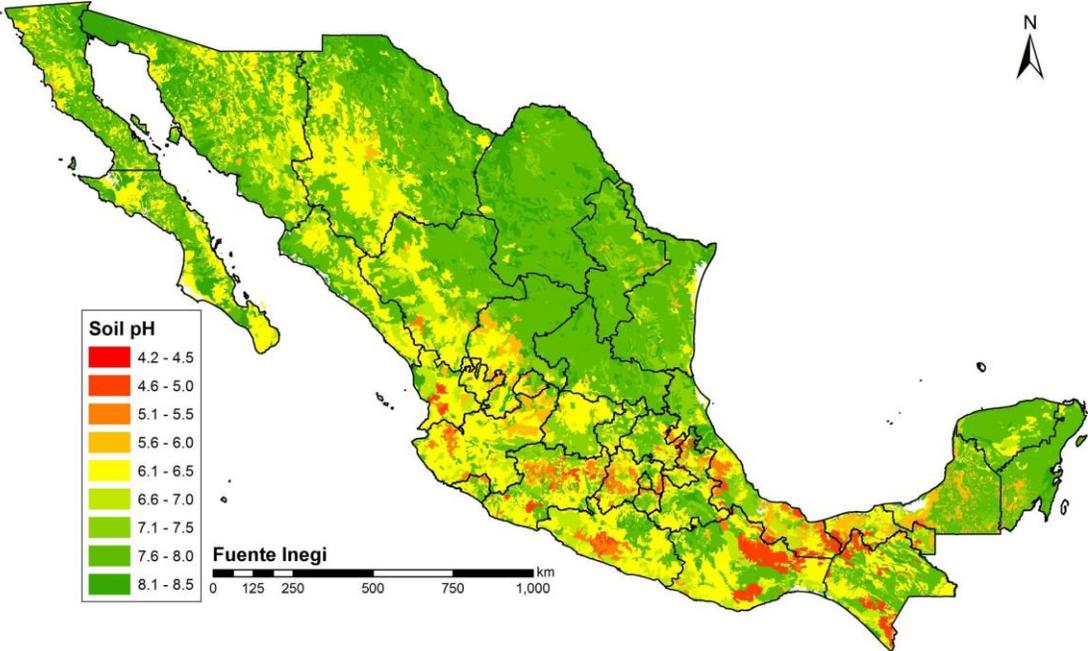


Figura 5. Distribución de suelos ácidos en México.

### **2.3. Materia orgánica de los suelos**

La materia orgánica (residuos de plantas y materiales animales) está hecha de compuestos tales como los carbohidratos, ligninas y proteínas. Los microorganismos descomponen la materia orgánica en dióxido de carbono y los residuos más resistentes en humus. Durante el proceso de descomposición los microbios pueden atrapar nitrógeno del suelo. La materia orgánica y el humus almacenan muchos nutrientes del suelo. También mejoran su estructura, sueltan suelos de arcilla, ayudan a prevenir la erosión y mejoran la capacidad de retención de nutrientes y agua de suelos arenosos o toscos. La cantidad de materia orgánica del suelo depende de la vegetación, el clima, la textura del suelo, el drenaje del mismo y de su laboreo. Los suelos minerales con mayor contenido de materia orgánica son normalmente los suelos de praderas vírgenes. Los suelos de bosques y aquellos de climas cálidos tienen una menor cantidad de materia orgánica.

La materia de la naturaleza se transforma mediante conversiones biológicas. Aunque todos los seres vivos contribuyen a la vida, los microorganismos desempeñan un papel destacado en los cambios geoquímicos y la fertilidad del suelo. Transforman una cantidad enorme de materia orgánica y solamente ellos pueden realizar ciertas transformaciones esenciales. Estos cambios se realizan en diversos ecosistemas de la biosfera.

Muchas transformaciones tienen lugar en el suelo, otras en ambientes acuáticos o en la atmósfera. Los actinomicetes, bacterias Gram positivas aerobias que forman micelios ramificados, degradan los restos vegetales y animales, polímeros complejos e hidrocarburos y mantienen el suelo suelto y desmenuzado. La disponibilidad de nutrientes y de oxígeno determina el número y los tipos de actinomicetes de un suelo.

Otro grupo de organismos aerobios, los hongos, degradan la materia orgánica del suelo (de los compuestos simples a los polímeros complejos). Algunos hongos son depredadores de protozoos o nematodos, limitando su población en el suelo. Otros son micoparásitos, atacan a otras especies de hongos. Las algas se encuentran en

pequeña cantidad, no contribuyen de manera significativa a la fertilidad del suelo, excepto en los arrozales, donde las cianobacterias fijan grandes cantidades de nitrógeno.

La Materia Orgánica (MO) no tiene una sola definición universal para todos los investigadores, pero si coinciden que es la descomposición en diferentes grados de residuos de origen vegetal y animal, o también descrita por Stevenson es considerada como como *'El total de los compuestos orgánicos en el suelo con excepción de los tejidos vegetales y animales sin descomponer, sus productos de "descomposición parcial", y la biomasa del suelo.'* (Wershaw, 1983). La cual se presenta entre el 0-3% en los diferentes tipos de suelos, también llega a representar entre el 90-99% del peso seco en los seres vivos (Navarro *et al.*, 1995; Julca *et al.*, 2006).

La MO juega un papel muy importante en los ecosistemas, la cual es la causa de la sustentabilidad de la vida, esto dado por la complejidad de la composición de la misma, entre las cuales se destacan la biomasa, descomposición de organismos de diferentes reinos y sinterización a través de microorganismos.

La MO está compuesta principalmente por sustancias orgánicas como en Carbono (C) (52-58%), oxígeno (O) (34—39%), Hidrogeno (H) (3.3-4.4%) y Nitrógeno (N) (3.7-4.7%), en otros elementos destacan el Fósforo (P) y el Azufre (S) ("Environmental Soil Chemistry," 2003), ayudando a la fertilidad del suelo lo cual conlleva a un aporte vital para las cuestiones edafológicas y calidad del suelo, también tiene relación en forma directa o indirecta de las interacciones y reacciones químicas, físicas y biológicas en el sistema de suelo-agua-planta (Navarro *et al.*, 1995; Rojas *et al.*, 2018; Venegas, 2008).

Para poder determinar la cantidad de MO se pueden utilizar diferentes métodos, entre los cuales se encuentra walkley black (SEMARNAT, 2002).

La composición de la MO puede ser un factor de gran importancia en la acidez del suelo de más en zonas de producción ganadera. La acidez del suelo es un factor de gran importancia no solo a nivel comercial sino también para el momento de la

reforestación, esto ayudando para determinar el tipo de planta que se puede cultivar en la zona determinada.

La materia orgánica tiene efectos tanto directos como indirectos en la disponibilidad de nutrientes para el crecimiento de las plantas. Sirve como fuente de nutrientes como son el N, P, S a través de la mineralización por medio de microorganismos del suelo. La M.O influye en la provisión de nutrientes (por ejemplo, la materia orgánica es requerida como fuente de energía para bacterias fijadoras de N). La adición frecuente de residuos orgánicos de fácil descomposición lleva a la síntesis de compuestos orgánicos complejos que ligan partículas de suelo en unidades estructurales llamadas agregados. Estos agregados ayudan a mantener una condición suelta, abierta y granular. El agua puede penetrar y filtrar hacia abajo a través del suelo. Las raíces de las plantas necesitan una provisión continua de O<sub>2</sub> para poder respirar y crecer. Poros grandes permiten un mejor intercambio de gases entre el suelo y la atmosfera. El humus usualmente incrementa la habilidad del suelo a resistir la erosión. Primero, permite al suelo retener más agua, aún más importante es el efecto de promover la granulación y por lo tanto mantener grandes poros a través de los cuales el agua penetra y filtra hacia abajo. Entre 20 y 70% de la capacidad de intercambio en muchos suelos es causada por sustancias húmicas coloidales. Las acideces totales de las fracciones aisladas de humus están en el rango de 300 a 1400 meq/100g. En lo que a la acción amortiguadora se refiere, el humus exhibe capacidad amortiguadora en un amplio rango de pH. La materia orgánica sirve como fuente de energía tanto para organismos de macro y microfauna. Un número de bacterias, actinomicetes y hongos en el suelo están relacionados de manera general al contenido de humus lombrices y otros organismos de la fauna están fuertemente influenciados por la cantidad de residuos vegetales retornados al suelo (Martínez y Rodríguez, 2010).

Función de la materia orgánica en el suelo contribuye al crecimiento vegetal mediante sus efectos en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo tiene: \*Función nutricional la que sirve como fuente de N, P para el desarrollo

vegetal. \*Función biológica la que afecta profundamente las actividades de organismos de microflora y microfauna. \*Función física y físico-química la que promueve una buena estructura del suelo, por lo tanto mejorando la labranza, aireación y retención de humedad e incrementando la capacidad amortiguadora y de intercambio de los suelos.

La materia orgánica (residuos de plantas y materiales animales) está hecha de compuestos tales como los carbohidratos, ligninas y proteínas. Los microorganismos descomponen la materia orgánica en dióxido de carbono y los residuos más resistentes en humus. Durante el proceso de descomposición los microbios pueden atrapar nitrógeno del suelo. La materia orgánica y el humus almacenan muchos nutrientes del suelo. También mejoran su estructura, sueltan suelos de arcilla, ayudan a prevenir la erosión y mejoran la capacidad de retención de nutrientes y agua de suelos arenosos o toscos. La cantidad de materia orgánica del suelo depende de la vegetación, el clima, la textura del suelo, el drenaje del mismo y de su laboreo. Los suelos minerales con mayor contenido de materia orgánica son normalmente los suelos de praderas vírgenes. Los suelos de bosques y aquellos de climas cálidos tienen una menor cantidad de materia orgánica.

Los compuestos orgánicos son todas las especies químicas que en su composición contienen el elemento carbono (C) y, usualmente, elementos tales como el Oxígeno (O), Hidrógeno (H), Fósforo (F), Cloro (CL), Yodo (I) y nitrógeno (N), con la excepción del anhídrido carbónico, los carbonatos y los cianuros

La degradación de la m.o. del suelo produce como primera etapa de mineralización productos simples, pero al continuar el proceso, más la acción continuada de microorganismos se produce la formación de complejos orgánicos que se llaman sustancias húmicas. Estas sustancias que son las que forman el humus, son de composición compleja. En la primera etapa, tiene lugar una degradación predominantemente microbiana de los polímeros orgánicos que forman constituyentes monoméricos (fenoles, quinonas, aminoácidos y azúcares). Permanecen los materiales más resistentes, como la lignina, pero son levemente cambiados para formar humus.  $Materia\ orgánica + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O + \text{humus}$ , esta

reacción actúa rápidamente (en condiciones favorables requiere semanas o meses), la denominaremos humificación directa. Durante la segunda etapa tiene lugar la polimerización de dichos componentes mediante reacciones químicas espontáneas o mediante procesos de autooxidación y oxidación, catalizados por enzimas microbianas.

Importancia de mantener materia orgánica del suelo los organismos dependen de sus fuentes de alimentación (las cuales a su vez dependen de la estación) y, por lo tanto, no están uniformemente distribuidas a través del suelo ni uniformemente presentes todo el año. Cada especie y grupo existen donde pueden encontrar un suministro apropiado de alimentos, espacio, nutrientes y humedad. Esas condiciones ocurren dondequiera que esté presente la materia orgánica; por lo tanto, los organismos del suelo están concentrados alrededor de las raíces, en los residuos, en el humus, en la superficie de los agregados del suelo y en los espacios entre esos agregados. La disponibilidad de alimentos es un factor importante que influye en el nivel de actividad de los organismos del suelo y, por ende, está relacionado con el uso y manejo del suelo.

El suelo tiene cuatro componentes principales: la fracción mineral, la fracción orgánica, aire y agua. La fracción mineral está formada por partículas de arena, limo y arcilla, la textura básica del suelo. El agua del suelo contiene minerales disueltos y es la principal fuente de agua y nutrientes para los vegetales. El aire del suelo es necesario para que las raíces de las plantas y los microorganismos del suelo tengan oxígeno. La fracción orgánica (materia orgánica) incluye vegetales y animales en varios estados de descomposición. Los animales muertos y los restos vegetales comienzan a descomponerse tan pronto caen al suelo o son adicionados. La macro y mesofauna comienza a fraccionar los restos, al tiempo que la población de microorganismos se incrementa rápidamente. Los microorganismos consumen los restos de animales y vegetales, luego mueren y pasan a formar parte de la MOS. Una parte de la materia orgánica se descompone más rápidamente que otras, el

producto final de la descomposición es el humus; materia orgánica negra o marrón oscuro que es altamente resistente a la descomposición (FAO).

La mayor parte de la materia orgánica se encuentra cerca de la superficie del suelo, la parte aéreas de las plantas que no se cosechan quedan en superficie y las raíces se convierten en materia orgánica cuando sus células pierden funcionalidad o mueren. La mesofauna del suelo (lombrices, insectos) incorporan los residuos más profundamente en el suelo por lo que la mayor concentración de MOS se da en los primeros 15-20 centímetros de suelo. Desde que la MOS describe todos los componentes orgánicos que se encuentran en el suelo y por tanto comprende un sin número de elementos - por ejemplo: carbono, nitrógeno, fósforo hidrógeno, oxígeno, azufre – presenta ciertas dificultades medir el contenido real de MOS. Por ello, el desarrollo analítico está centrado en métodos para determinar el carbono orgánico del suelo (COS) y estimar el contenido de MOS a través de factores de conversión. Como existe variación entre diferentes suelos (incluso horizontes), así como en los métodos analíticos y en el factor de conversión, tradicionalmente se informa el valor de COS sin transformar. Esto se ha acentuado en los últimos años en virtud del alcance que han tomado todos los aspectos relativos a cambio climático, emisión de gases de efecto invernadero, balance de carbono, bonos de carbono.

El contenido de carbono en un suelo depende de las características de este y del equilibrio entre la tasa de entrada de carbono orgánico (animales, vegetales, raíces) y la tasa de salida ( $\text{CO}_2$  desprendido por el metabolismo microbiano). Por tanto, existen diversos factores y las interacciones entre ellos que afectan la cantidad de COS total en un perfil, así como su distribución en profundidad. Podemos citar: tipo de suelo, clima, composición mineral, topografía y la biota del suelo. Algunos de estos factores son características fijas del suelo, otros están determinados por el clima y otros son influenciados por las prácticas de manejo. La cantidad total potencial de carbono que un suelo podría contener depende de factores tales como el contenido de arcilla, la profundidad y densidad del suelo y la vegetación que soporta. No influyen en ese contenido total potencial las prácticas de manejo del

suelo. El contenido de carbono en gran medida está determinado por el tipo de material que compone la entrada del carbono al suelo, no toda la materia orgánica que ingresa es igual y por tanto varían los niveles de descomposición de la misma. Por ejemplo, los residuos de frutas, verduras y restos vegetales frescos se degradan fácilmente pues contienen mayormente carbohidratos. Por el contrario, las hojas secas, tallos, cortezas y ramas se descomponen más lentamente debido a que contienen altas proporciones de lignina, celulosa y hemicelulosa. La facilidad con la que los compuestos se degradan está determinada por la complejidad molecular de los compuestos carbonados y en general el orden es: carbohidratos > hemicelulosa > celulosa/quitina > lignina. Es por ello que en la MOS (COS) se pueden diferenciar fracciones en función de su disponibilidad para la descomposición microbiana:

- La fracción activa o carbono activo con un alto índice de rotación (1 a 2 años).
- La fracción intermedia con una rotación de dos a cinco años.
- Y la fracción estable o carbono estable (recalcitrante) que es materia orgánica bien descompuesta con más de 5 años, esta fracción, si bien no brinda mayor cantidad de nutrientes para las plantas y para los microorganismos del suelo como la fracción activa, juega un rol imprescindible en la mejora y mantenimiento de las propiedades físicas y químicas del suelo.

A pesar de ser la fracción menor de la composición del suelo, la materia orgánica es el componente principal que determina la calidad y productividad del suelo. La fertilidad, la disponibilidad de agua, la susceptibilidad a la erosión, la compactación, e incluso la resistencia de las plantas a los insectos y las enfermedades, dependen en gran medida de la materia orgánica del suelo. LA MOS (COS) es el elemento de enlace de las propiedades biológicas, químicas y físicas de un suelo, se asocia y cumple roles esenciales en numerosas funciones del mismo como el ciclo de los nutrientes, la retención de agua y el drenaje, el control de la erosión, la supresión de enfermedades y la remediación de la contaminación. La MO afecta la calidad de éste pues: almacena y suministra los nutrientes para las plantas (macro y micronutrientes, incrementa la capacidad de intercambio catiónico, la capacidad de

intercambio aniónico y estabiliza la acidez del suelo); estabiliza y mantiene las partículas del suelo en forma de agregados; ayuda a minimizar la compactación del suelo, favorece la infiltración de agua y reduce el escurrimiento; facilita el crecimiento de los cultivos mediante la mejora de la capacidad del suelo para almacenar agua. Mejora la dinámica del agua y del aire en el suelo mediante el incremento de la porosidad, la capacidad de retención de agua y la resistencia a la sequía; aumenta la friabilidad del suelo que lo hace más fácil de trabajar y permite que las raíces de las plantas puedan penetren mejor en el perfil y con menor gasto de energía; es la fuente de carbono y energía para los microorganismos del suelo que reciclan los nutrientes; reduce los efectos ambientales negativos de los agroquímicos, metales pesados y otros contaminantes.

El uso de la materia orgánica se ha convertido en la base para la agricultura orgánica se mira un efecto positivo en la agricultura aumentando los rendimientos una de las técnicas más utilizadas fue el uso de residuos orgánicos. En países como lo es España, Alemania e Italia se ha mirado lo favorable que es el uso de la materia orgánica tanto que en el país de Austria se usa en forma de pellet para un mejor beneficio positivo en la planta por las cuestiones favorable que le aporta y hasta en el manejo del agua se tiene un ahorro muy favorable que ayuda mucho al medio ambiente (Julca *et al.*, 2006).

Los suelos agrícolas en México son generalmente pobres en materia orgánica, con valores menores a 1%. Un suelo con 1.0% de materia orgánica solo aporta 17.4 kg de N por ha, mientras que uno que es rico en esta (4%) puede contribuir con hasta 69.6 kg de N por ha, calculado a partir de su porcentaje de mineralización anual de 1.5%, con un contenido de nitrógeno en la materia orgánica de 5.8% para un peso de suelo por hectárea de  $2 \times 10^6$  kg en los primeros 15 cm de profundidad. Esto es un indicador de la importancia que tiene la materia orgánica en el suelo desde el punto de vista nutrimental, aunque no solo es importante como fuente de nutrimentos, sino también por ser un mejorador de las características físicas y almacén de energía para la vida microbiana del suelo. La única forma de mantener un buen contenido de materia orgánica en el suelo es mediante la adición de abonos

orgánicos y residuos vegetales e industriales apropiados y transformados como compost y vermicompost (Trinidad y Velasco, 2016).

## **2.4. La geoestadística en la interpolación espacial de datos**

### *Técnicas geoestadísticas en la interpolación*

Técnicas de interpolación espacial. La interpolación espacial, se puede definir como un procedimiento que permite calcular el valor de una variable en una posición del espacio (punto no muestral con valor estimado), conociendo los valores de esa variable en otras posiciones del espacio (puntos muestrales con valores reales) (Bosque. 1992). En la actualidad existe una gran cantidad de métodos de interpolación espacial. Li y Heap (2008) describieron 42 métodos y los agruparon en tres distintas categorías: 1) los métodos no geoestadísticos, 2) métodos geoestadísticos y 3) métodos combinados. En geoestadística, los métodos que son capaces de utilizar la información secundaria se refieren a menudo como "multivariable" (es decir, el uso de Según Li y Heap (2008), dentro de los métodos no geoestadísticos, se encuentran: el vecino más cercano; red triangular de interpolación irregular relacionada; vecino natural; distancia inversa ponderada; modelos de regresión; series de Fourier; entre otros. Los métodos geoestadísticos son univariados y multivariados, en los primeros se encuentran: kriging simple; kriging ordinario; kriging en bloques; kriging factorial; kriging disyuntivo y otros. De los métodos multivariados están: kriging universal; kriging simple con variación local de medias; con kriging simple; con kriging ordinario; con kriging ordinario estandarizado; kriging factorial multivariado; entre otros. En los métodos combinados están el análisis de superficie con tendencia combinada con kriging; modelo lineal mixto; árbol de regresión combinado con el kriging; etc.

En la mayoría de los métodos de interpolación espacial, la forma en que es estimado el valor de  $\hat{Z}$  (no muestral), es mediante el promedio ponderado. La fórmula general para todos ellos es:

$$\hat{Z}(x_0) = \sum_{k=1}^n \lambda_k Z(x_k)$$

Donde  $\hat{Z}$  es el valor estimado de un atributo en el punto de interés  $x_0$ ,  $Z$  es el valor observado en el punto de muestra  $x_k$ ,  $\lambda_k$  es el peso asignado al punto muestreado, y  $n$  representa el número de puntos de muestra usados para la estimación (Webster y Oliver, 1992).

El método del vecino más cercano predice el valor de un atributo en un punto no muestreado, con base al valor de la muestra más cercana mediante la elaboración de bisectrices perpendiculares entre puntos de muestra ( $n$ ), formando polígonos ( $V_i$ ,  $i=1,2,\dots,n$ ) (Webster y Oliver, 1992). La media medida se ubica en el centro del polígono, asignando el mismo valor en el área dentro del polígono. Para generar los polígonos, ya existen un gran número de algoritmos (Gold and Condal, 1995). Las estimaciones del atributo en los puntos no muestreados en el polígono  $V_i$  son los valores medidos en los datos muestreados en el punto más cercano  $x_i$ , sería:  $z(x_0) = z(x_i)$ , y los pesos se representan:

$$\lambda_i = \begin{cases} 1 & \text{si } x_i \in V_i, \\ 0 & \text{lo contrario} \end{cases}$$

El método del inverso de la distancia ponderada (IDW, por sus siglas en inglés) calcula los valores de un atributo en puntos no muestreados usando una combinación lineal de los valores en puntos de la muestra ponderada por una función inversa de la distancia desde el punto de interés para los puntos muestreados (Webster y Oliver, 1992). El supuesto es que los puntos de muestreo más cerca del punto del área no muestreada se parecen más a él que los que están más lejos de sus valores. Los pesos pueden ser expresados como:

$$\lambda_i = \frac{1/d_i^p}{\sum_{i=1}^n d_i^p}$$

Donde  $d_i$  es la distancia entre  $x_0$  y  $x_i$ ,  $p$  es un parámetro de potencia, y  $n$  representa el número de puntos de muestra usados para la estimación. El factor principal que afecta a la exactitud de la IDW es el valor del parámetro de potencia (Isaaks y Srivastava, 1989). Los pesos disminuyen a medida que aumenta la distancia, especialmente cuando el valor de los parámetros de potencia aumenta; en muestras más cercanas tiene un peso más fuerte y más influencia en la estimación y la interpolación espacial resultante (Isaaks y Srivastava, 1989).

Dentro de los interpoladores usados existe un grupo llamado kriging, nombre dado por su creador, el ingeniero en minas surafricano D.G. Krige. Hasta el día de hoy, todos los interpoladores geoestadísticos están en el grupo de los kriging (con sus variantes), los cuales ofrecen no solo predicciones y superficies de respuesta requeridas, sino también mapas de probabilidades y cuantiles (Johnston et al. 2001). El kriging utiliza el variograma para predecir valores desconocidos de variables distribuidas espacialmente, a partir de datos observados en lugares conocidos. Kriging es por lo tanto, el método para calcular el valor de una variable  $Z$  en un punto  $X_0$  que ha sido considerado anteriormente, realiza una combinación lineal tomando los vecinos más cercanos. Un punto de interés  $X_0$ , utiliza la fórmula que es la suma ponderada sobre todos los sectores que conforman la zona de estudio.

$$Z(X_0) = \lambda_1 z(x_1) + \lambda_2 z(x_2) + \dots + \lambda_n z(x_n)$$

$$\hat{Z}(x_0) = \sum_i^n \lambda_i Z(x_i) \quad \text{y} \quad \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$$

Dónde:  $z(x_i)$  son los valores en los sitios donde hubo medición y  $\lambda_i$  es el vector de ponderación que minimiza el error de predicción.

En la literatura Xie *et al.* (2011) hace evidencia de las principales características que hacen del kriging un método de estimación muy superior a los tradicionales, como el inverso ponderado de la distancia, la triangulación, etc. Por ejemplo, mientras que los métodos tradicionales utilizan el concepto euclidiano de la distancia para el cálculo de los pesos que se aplicarán a cada dato muestral, el kriging considera tanto la distancia como la geometría de la localización de las muestras, lo que ofrece ser una de las técnicas de interpolación espacial más utilizadas en estudios ambientales (Isaaks y Srivastava, 1989). A esta técnica se le considera uno de los mejores estimadores lineales y tiene 2 características básicas: a) minimiza la varianza del error (el cuadrado de las desviaciones); y b) es un método insesgado porque trata que la suma de los errores sea cercana a 0.

### **3. HIPÓTESIS**

El análisis de la variabilidad y distribución espacial de la acidez activa (pH en agua, 1:2) y de los contenidos de materia orgánica de los suelos, permite identificar los posibles factores que influyen en la distribución del pH de los suelos de Tlajomulco de Zúñiga Jalisco.

### **4. OBJETIVO**

Establecer la variabilidad y distribución espacial del pH (acidez activa) y materia orgánica en el área agrícola del municipio de Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco, y establecer su relación, así como obtener un mapa temático y un modelo de predicción mediante el método geoestadístico KO.

#### **4.1.-Objetivos particulares**

- Obtener muestras de suelo georreferenciadas de diferentes sitios del área agrícola mediante la técnica de muestreo sistemático del municipio de Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco.
- Determinar las características físicas (análisis mecánico de partículas, densidad aparente) y químicas (pH y materia orgánica) de las muestras de suelo.
- Estimar los semivariogramas de las características pH y materia orgánica, para realizar un análisis estructural de los datos y obtener la variabilidad espacial de los mismos.
- Elaborar mapas temáticos de pH y contenido de materia orgánica mediante la técnica geoestadística Krigin Ordinario.

## 5. MATERIALES Y MÉTODOS

El área agrícola de Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco, México, comprende un área de 33,679.63 ha, que corresponde a 49.3% de la superficie total (68,247 ha) del municipio (Figura 6), fue donde se desarrolló el estudio.

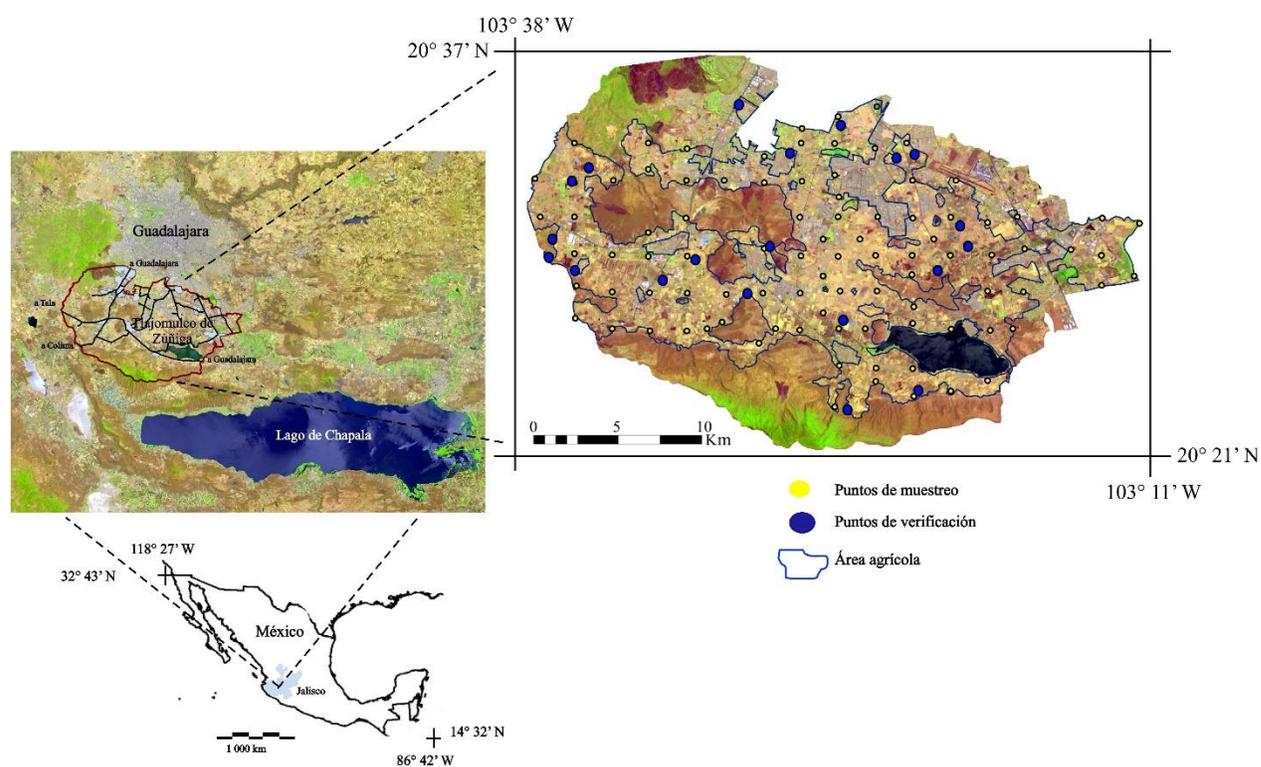


Figura 6.- Localización del área de estudio.

La geológica del lugar consta de rocas ígneas extrusivas del Terciario y aluviones del Cuaternario reciente dentro de la provincia fisiográfica Eje Neo-volcánico. Las rocas predominantes son tobas, que ocupan el 35.1% de la superficie, basaltos (28.6%), andesitas (6.7%), rocas vítreas (2.7%) y otras rocas (2.3%). Los aluviones (25.6%), compuestos partículas finas y piroclastos de diámetro menores que 4 mm

(IIEG-Jalisco, 2018a; Geomática-Jalisco, 2018), cuya distribución se presenta en la Figura 7.

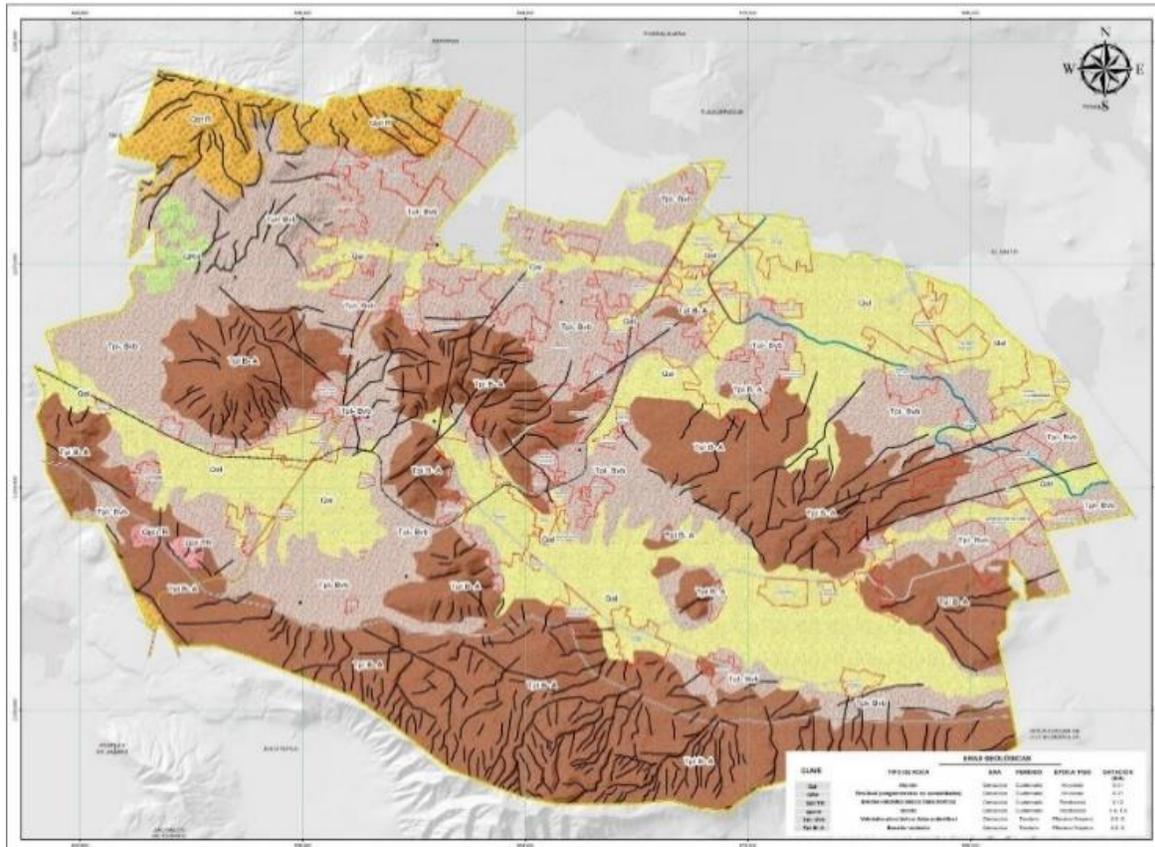


Figura 7. Geología del municipio de Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco (Adaptado de Geomática-Jalisco, 2018).

El municipio tiene un clima semi-cálido con lluvias en verano [(A) C(w<sub>o</sub>)] (García, 2004), con una temperatura media anual de 19.3 °C; mientras que, sus máximas y mínimas promedio oscilan entre 28.6 °C y 10.1 °C, respectivamente. La precipitación media anual es de 782.7 mm (SMN, 2020); con una evapotranspiración de 1857.8 mm (Figura 8). La vegetación está compuesta por mezquitales, matorrales y bosques de pino-encino. Los suelos están constituidos por Cambisoles, Feozem, Luvisoles, y Vertisoles. El uso del suelo es predominantemente

agrícola, siendo el maíz el principal cultivo (49.4%, de la superficie); aunque también se siembra en condiciones de temporal, en menor proporción, hay aprovechamientos con "punta de riego" y humedad residual (IIEG-Jalisco, 2018b).

Mes	T (°C)	P (mm)	ETP (mm)
E	14.7	21.1	121.3
F	16.5	4.7	132.6
M	18.4	2.5	176.4
A	21.0	4.7	194.5
M	22.8	17.7	213.3
J	23.1	165.3	176.6
J	21.5	194.3	160.6
A	21.3	179.1	156.0
S	20.9	137.5	141.0
O	19.8	44.2	142.4
N	17.0	5.4	127.4
D	15.0	6.2	115.7
Anual	19.3	782.7	1988.1

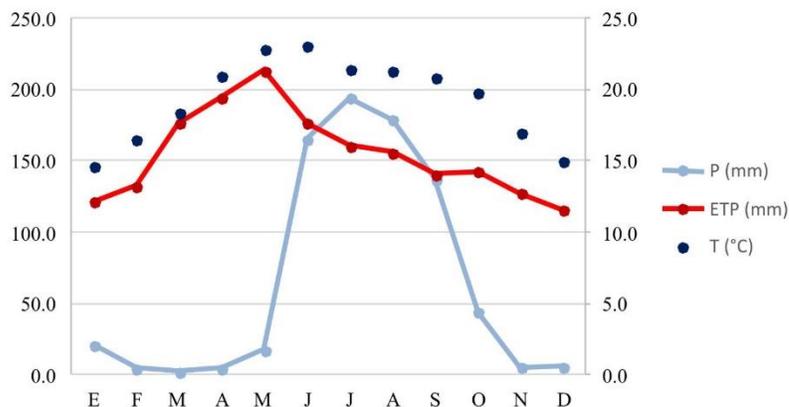


Figura 8.- Climograma del municipio de Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco.

## Metodología

El estudio constó de cuatro fases: a) ubicación de puntos de observación y toma de muestras, b) determinaciones químicas en laboratorio, c) estadística descriptiva, análisis de la estructural espacial e interpolación de los datos y d) verificación de mapas, que se describen a continuación.

### a) Ubicación de puntos de observación y toma de muestras.

Una cuadrícula o grid (2,500 X 2,500 m) con proyección UTM se sobrepuso en el polígono correspondiente al uso de suelo agrícola dentro municipio. Cada intersección del grid constituyó un punto viable para la toma de muestra; de tal manera que, las coordenadas de cada punto se registraron, con el fin de localizarlas

posteriormente en campo. La accesibilidad a cada punto de muestreo, fue la condición para la elección final de cada punto (Yescas *et al.*, 2018); considerando como base la carta topográfica del municipio (INEGI, 2019). En el punto seleccionado se registraron las coordenadas con un GPS marca Garmin y se recolectó una sola muestra de suelo (2 kg, aproximadamente) de la superficie (0 a 30 cm de profundidad), para trasladarla al laboratorio; además, se obtuvo información acerca del uso de suelo en cada sitio.

#### **b) Determinaciones físicas y químicas en laboratorio.**

El suelo de cada punto de muestreo se secó a la sombra y a temperatura ambiente. Una vez secos, un kilogramo de cada muestra se molió y pasó por un tamiz (2 mm de diámetro). Una parte de suelo molido y tamizado, se utilizó para determinar las características físicas y químicas del suelo como: el análisis del tamaño de partícula (método de la pipeta) para la establecer la clase textural del suelo; pH del suelo (en agua 1:2, con potenciómetro Hanna HI-2211). La otra parte del suelo se molió y tamizó con una malla de 0.5 mm, con la que se obtuvo el porcentaje de MO (método Walkley y Black, 1934). Los procedimientos de cada determinación se obtuvieron de la Norma Oficial Mexicana NOM021 (SEMARNAT, 2002). En los análisis químicos se utilizaron patrones y reactivos de la marca Merck®.

#### **c) Estadísticas descriptivos, análisis de la estructural espacial e interpolación de los datos.**

Las coordenadas de cada punto de muestreo y los resultados de pH y porcentajes de MO se utilizaron para elaborar una base de datos. Con esta base en primer lugar, se obtuvieron los estadísticos descriptivos de las variables de estudio como promedio, valores máximos y mínimos, desviación típica, coeficientes de variación (C.V.), asimetría y curtosis.

La base de datos también se usó para el estudio estructural en el espacio del pH y MO, a través de la semivarianza. De acuerdo con Jaramillo (2012), este tipo de

estudio permite determinar la existencia de semejanzas entre datos a distancias fijas (*lag*), que se obtuvo con la siguiente ecuación (1).

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z_{(X_i)} - Z_{(X_i+h)}]^2 \quad (1)$$

donde:  $\gamma(h)$  semivarianza para pH, MO de los suelos localizados en el espacio a una distancia dada ( $h$ );  $N(h)$  es el número total de pares de datos a una distancia dada ( $h$ );  $Z_{(X_i)}$  es el dato de la muestra en una ubicación  $X_i$ ;  $Z_{(X_i+h)}$  es el dato de la muestra a la distancia  $h$  hasta  $X$ .

La distancia activa en el estudio fue de 30 000 m, con un lag de 15 de tamaño de 2 000 m. Este semivariograma experimental sirvió de base para ajustar a las semivarianzas a un modelo esférico; asimismo, se ajustaron a este modelo, para cuantificar la variabilidad espacial del pH y MO para su cotejo (Yescas *et al.*, 2018). Los parámetros que se utilizaron para explicar esta variabilidad y obtener modelos de predicción, fueron: el efecto pepita o *nugget* ( $Co$ ), la meseta o *sill* ( $Co+C$ ), la varianza estructural ( $C$ ) y el alcance o rango (Gallardo, 2006); asimismo, se estimó el grado de dependencia espacial [ $Co/(Co+C)$ ] y el grado de variación espacial [ $C/(Co+C)$ ] (Jaramillo, 2012). Por otra parte, con el interpolador KO, se generó cartografía temática predictiva de pH y porcentaje de MO; ya que Elbasiouny *et al.* (2014), KO es útil en variables ambientales y agrícolas. El procesamiento de datos se llevó a cabo con el software ArcMap 10.3©, específicamente con su extensión Geoestatistical Analyst (ESRI, 2014). Los resultados en los mapas de predicción se agruparon en cuatro clases para el  $pH_p$ , y cinco clases para  $MO_p$ . En esa misma extensión, se realizó una validación cruzada con el fin de verificar la certidumbre de los valores predichos derivados de los modelos de predicción ( $pH_p$  y  $MO_p$ ), con lo que se obtuvieron los coeficientes de determinación ( $R^2$ ), las medias del error de la predicción ( $ME_p$ ), la raíz cuadrada media del error de la predicción ( $RCME_p$ ), la media del error estandarizado de la predicción ( $MEE_p$ ), el promedio del error estándar de la predicción ( $PEE_p$ ) y la raíz cuadrada media del error estandarizado de la predicción ( $RCMEE_p$ ).

#### d) Verificación de mapas.

En esta parte se verificó la precisión de los mapas de predicción, para lo cual 20 puntos fueron seleccionados en forma digital en el área de estudio mediante un muestreo aleatorio simple con la herramienta Create Random Points del software ArcMap 10.3 (ESRI, 2014). De cada punto seleccionado, se registraron sus coordenadas UTM; posteriormente se acudió a campo para localizar cada uno de los puntos, donde se recolectó una muestra única de suelo de la capa superficial (0-30 cm de profundidad). Estas muestras fueron trasladadas al laboratorio, donde se prepararon para su análisis; nuevamente se determinaron pH y porcentaje de MO. Estos resultados se compararon con los valores de las variables correspondientes a cada punto de los mapas de predicción en una matriz de error. Los índices estadísticos que se utilizaron para evaluar la precisión fueron la RCME (raíz cuadrada del error cuadrático medio) y el EMS (error medio del sesgo) con las siguientes ecuaciones (Douglas *et al.*, 2009).

$$RCME = \sqrt{\frac{\sum_1^n (y - \hat{y})^2}{n}} \quad (3)$$

donde: *RCME* es la raíz cuadrada del error cuadrático medio de la variable correspondiente, *y* es el valor de la variable que se estimó con los modelos predictivos para cada mapa temático (en su caso pH<sub>p</sub> y MO<sub>p</sub>),  $\hat{y}$  es el valor de la variable (pH y MO) que se obtuvo en las muestras de suelos en los puntos de verificación y *n* es el número total de muestras.

$$EMS = \frac{\sum_1^n (y - \hat{y})^2}{n} \quad (4)$$

donde  $EMS$  es el error medio de la variable correspondiente, mientras que los demás símbolos significan lo mismo que en la ecuación (3). El software estadístico que se empleó en esta fase fue Minitab 17 (Minitab Inc., 2013).

## 6. Resultados y discusiones

### 6.1. Características de físicas y químicas de los suelos

Los suelos que se muestrearon de Tlajomulco tuvieron características físicas y químicas con un comportamiento diferente dentro del área de estudio. Las clases texturales que se identificaron fueron de arcilla, francos arcillosos y francos arenosos. Mientras que, el pH varió de 4.0 a 7.15 (Cuadro 1); la MO fue en promedio de 2.16%. Los coeficientes de variación fluctuaron de 0.14 en el pH y 0.37 en MO. La distribución de los datos de las variables fue normal, como se constató a través de la asimetría y la curtosis que se encontraron en el rango -3, 3.

Cuadro 1. Estadísticas descriptivas de algunas características y propiedades de los suelos del municipio de Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco.

Variable	<i>N</i>	$\bar{X}$	$\sigma$	C.V.	$\bar{X} \pm \sigma$	Mínimo	Máximo	Asimetría	Curtosis
pH	91	5.34	0.75	0.14	4.59 – 6.09	4.00	7.15	0.56	-0.51
MO	91	2.16	0.81	0.37	1.35 – 2.97	0.14	3.93	-0.31	0.14

Las fracciones más finas (arcilla y franco arcillosas) se encontraron en las partes más bajas del área de estudio; en cambio en las partes medias se identificaron texturas medias. Porta *et al.* (2003) indican que, los procesos de sedimentación en cuencas cerradas, las partículas más finas ocupan las áreas más bajas, mientras que las medias se encuentran en la parte media. Estos suelos, de acuerdo a los rangos de pH, se tratan de extremadamente ácidos a neutros (Weil y Brady, 2017), característica que presentan los suelos de origen volcánico de México y otras partes del mundo (Acevedo-Sandoval *et al.*, 2003; Valle *et al.*, 2014; Zúñiga *et al.*, 2016). Los porcentajes de MO fueron de medios a bajos (SEMARNAT, 2002), como se reporta para suelos de cultivo (Porta *et al.*, 2003); sin embargo, la MO depende del

origen del material y manejo del suelo (Blanco-Canqui *et al.*, 2015). Los porcentajes de MO que tuvieron los suelos agrícolas de Tlajomulco, fueron semejantes a los reportados en suelos con labranza tradicional de climas templados (Mishra *et al.*, 2010); de acuerdo con Weismeyer *et al.* (2013), el contenido de MO puede ser resultado del uso y manejo del suelo. La disparidad de los C.V. del pH y MO en estudio, reflejan la naturaleza de cada variable (Cristobal-Acevedo *et al.*, 2015). Por otra parte, cuando los valores de asimetría y curtosis se encuentran dentro del rango -3 a 3, se asume que el 99.5% de los datos de las variables se ajustan a una distribución normal (Dorić *et al.*, 2009).

## 6.2 Estructura espacial de pH y MO

Las semivarianzas ( $\gamma(h)$ ) de las variables pH y MO se ajustaron a modelos esféricos, con  $R^2$  menores que 0.82 (Figura 9); donde, el rango de la semivarianza fue mayor que la distancia de muestreo (2,500 x 2,500 m); aunque, el pH (2 834.53 m) fue menor que los 30,000 m de MO.

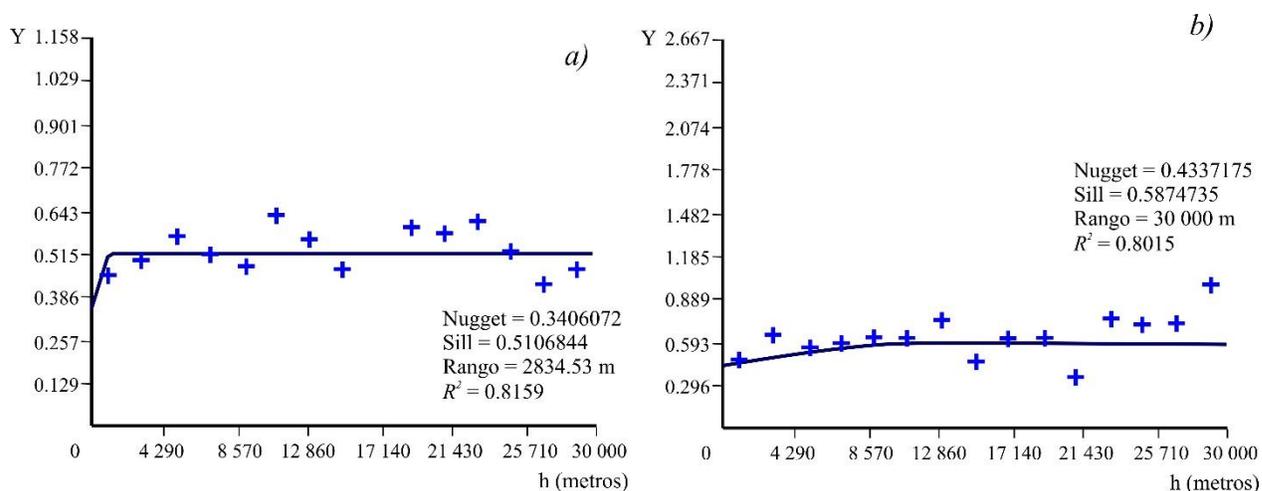


Figura 9.- Semivariogramas de: a) acidez activa y b) porcentajes de MO.

Mientras que, los *nugget* ( $C_0$ ) fueron menores que los sill ( $C_0 + C$ ) en los dos casos; en cambio,  $C_0$  fue mayor que la varianza estructural ( $C$ ) en los dos atributos. Por otra parte, la dependencia espacial ( $C_0 / (C_0 + C)$ ) de las dos variables de estudio se comportó de manera diferente (Cuadro 2); aunque, esta dependencia fue moderada. Asimismo, al analizar la variación espacial ( $C / (C_0 + C)$ ), el pH (33.3%) fue mayor que MO, por lo que pH es más predecible espacialmente y más bajo el nivel de incertidumbre al realizar la interpolación que en MO (Cuadro 2).

Cuadro 2. Dependencia espacial y variación espacial de las variables pH y MO.

Variable	$C$	$C_0 / (C_0 + C)$ (%)	$C / (C_0 + C)$ (%)
pH	0.1700772	66.7	33.3
MO	0.1537560	73.8	26.2

Por otra parte, la validación cruzada de los modelos mostró que para  $pH_p$  tuvo un  $R^2 = 0.7905$ , menor que en  $MO_p$  ( $R^2 = 0.8045$ ). Estos modelos tuvieron errores bajos ( $< 0.025$ ); mientras que sus  $ME_p$  y la  $MEE_p$  fueron cercanos a cero (Cuadro 3). El  $MEE_p$  de  $MO_p$  fue más bajo (0.002). Lo anterior significa que los valores predichos de pH y MO no tiene un completo ajuste a los valores medidos. De acuerdo con la incertidumbre, la variabilidad de las predicciones se subestimó, ya que la  $RCME_p$  de  $pH_p$  y  $MO_p$  (0.7875 y 0.8340, respectivamente) fue mayor que sus respectivos  $PEE_p$  (0.7355 y 0.7101); resultados que se confirma con la  $RCMEE_p$  que fue mayor que uno.

Cuadro 3. Validación cruzada.

Variable	N <sup>†</sup>	R <sub>2</sub>	ME <sub>p</sub>	RCME <sub>p</sub>	MEE <sub>p</sub>	RCMEE <sub>p</sub>	PEE <sub>p</sub>
pH	91	0.7905	0.0233	0.7885	0.0234	1.0690	0.7355
MO	91	0.8045	0.0016	0.8340	0.0021	1.1535	0.7101

<sup>†</sup>N: número de muestras, R<sub>2</sub>: coeficiente de determinación, ME<sub>p</sub>: media del error de la predicción, RCME<sub>p</sub>: raíz cuadrada media del error de la predicción, MEE<sub>p</sub>: media del error estandarizado de la predicción, RCMEE<sub>p</sub>: raíz cuadrada media del error estandarizado de la predicción, PEE<sub>p</sub>: promedio del error estandarizado de la predicción.

El ajuste de las semivarianzas de pH y MO a modelos esféricos, es consistente con lo reportado en diferentes trabajos, donde se indica que este modelo tiene un mejor ajuste a los datos de características edáficas (pH, materia orgánica) en la definición de su distribución espacial (Henríquez *et al.*, 2013; Bhunia *et al.*, 2016; Sreenivas *et al.*, 2016;). Por otra parte, Villatoro *et al.* (2008) mencionan que, los rangos al ser mayores que las distancias de muestreo, sugieren una fuerte autocorrelación; la cual podría encontrarse en alguna característica del suelo o en su uso (Haws *et al.*, 2004), lo que significa que la ubicación de sitios de muestreo a una distancia mayor que las utilizadas en nuestra investigación, asegurarían la detección de variabilidad espacial (Montomiya *et al.*, 2011). Además, la estructura y dependencia espacial se manifestaron al encontrarse nugget más bajos que los sill (Yamamoto y Landim, 2013). Asimismo, las dos variables al presentar una dependencia espacial moderada, indica que podrían estar correlacionadas con algunas características del ambiente o del suelo (Pingguo *et al.*, 2016). Aunque, se ha reportado que la dependencia espacial de la MO y el carbono orgánico se debe principalmente al manejo del suelo (Yescas *et al.*, 2018). En función de lo anterior, el comportamiento de la distribución espacial de las variables de estudio, podría estar relacionado a factores formadores del suelo (material parental, fisiografía, biota) e incluso el factor humano; no obstante, nuestra investigación no abordó un estudio de génesis de suelos.

### 6.3 Distribución espacial del pH y MO

Los suelos fuertemente ácidos (4.5 – 5.0) se encuentran principalmente en la porción este del área agrícola de Tlajomulco (Figura 10a) y ocupan un 14.2% del área agrícola (Cuadro 3); mientras que, los neutros (6.5 – 7.1) se localizan en la porción oeste (ocupando el 6.7% de la superficie de estudio); en tanto que, los moderadamente ácidos ocupan el resto de la superficie. El pH tiene un comportamiento descendente en el sentido oeste-este.

En cambio, la distribución de la MO fue inversa a la distribución del pH, ya que los menores porcentajes de MO (1.18 – 1.75%) se incrementan en el sentido oeste-este, hasta alcanzar los rangos de 2.60 – 2.90%. Mientras que, en la parte central del área agrícola se encuentran en una mayor proporción los porcentajes de MO que van de 2.00 a 2.30%. Aunque la correlación entre el pH con la MO ( $r = 0.126$ , con  $p = 0.236$ ) es muy débil.

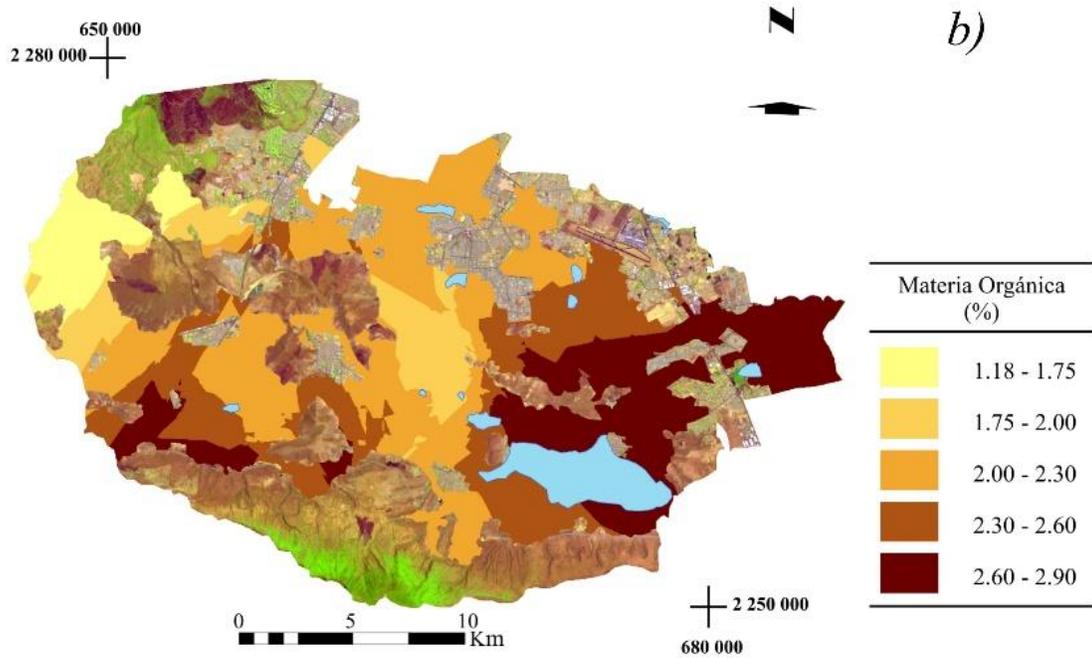
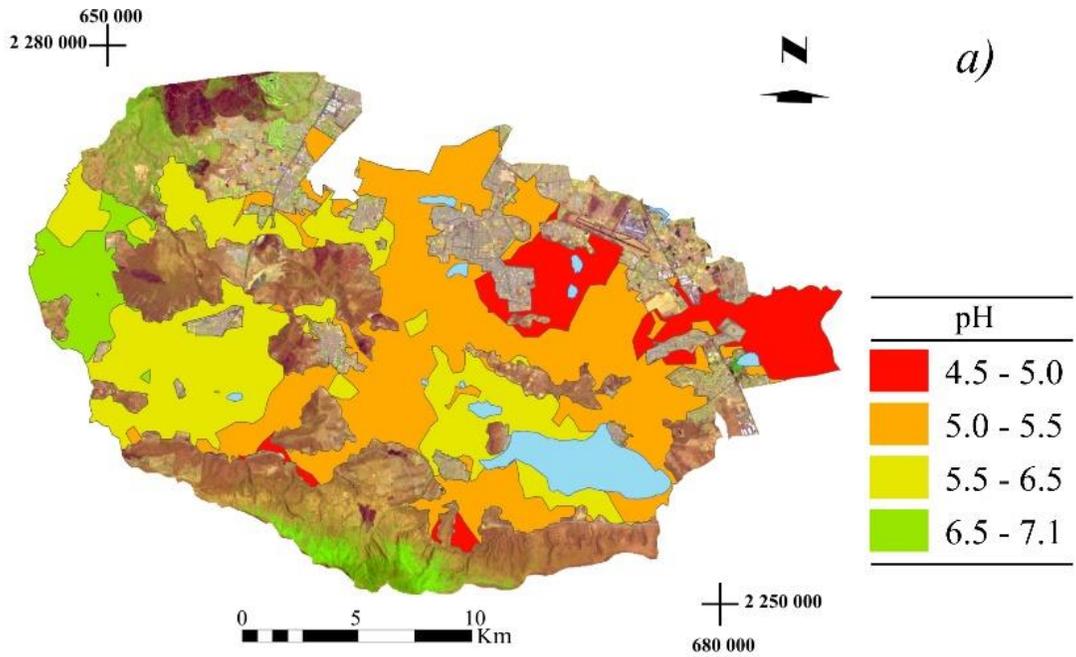


Figura 10.- Mapas temáticos de: a) acidez activa y b) porcentaje de MO.

Al considerar que el área agrícola está constituida por sedimentos aluviales del cuaternario, así como de toba andesítica y partículas piroclásticas (Figura 6), y que la fisiografía del municipio de Tlajomulco de Zúñiga, muestra partes altas y llanuras de inundación con aluviones estables (Figura 11), características del medio físico que también podrían influir en el comportamiento del pH, como lo ha mencionado en estudios de otros municipios de Jalisco (Ibarra-Castillo *et al.*, 2009); sin embargo, en toda el área agrícola se encuentran estos materiales y geoformas, que no reflejan una tendencia en relación con la distribución de las variables.

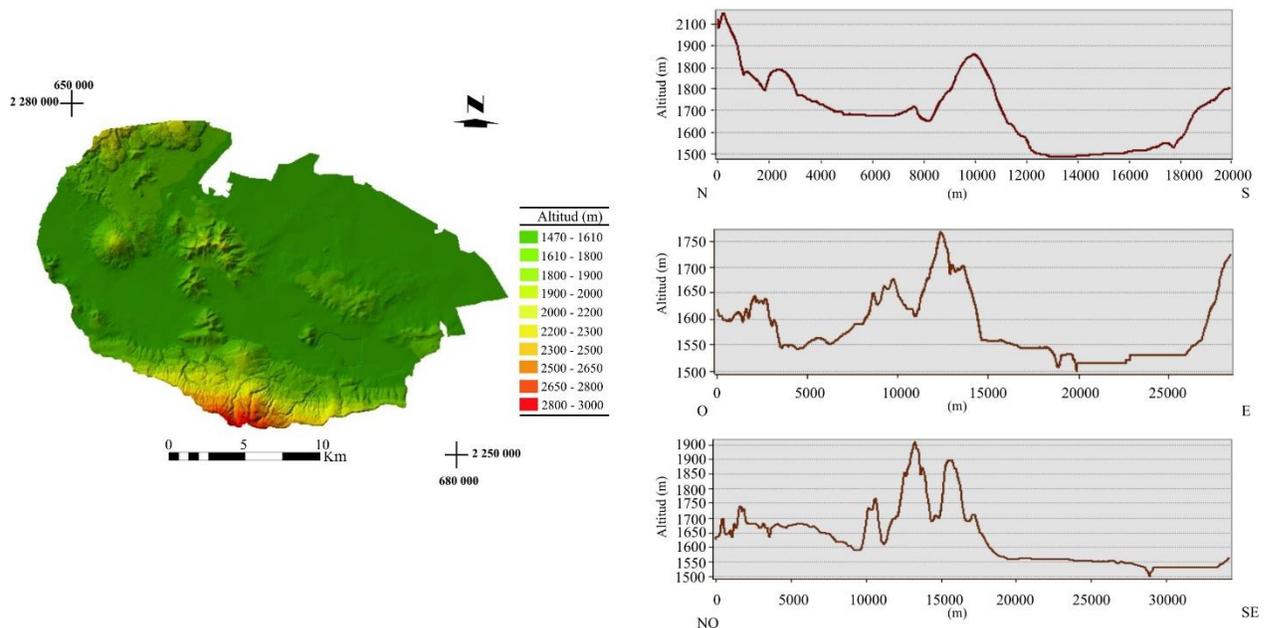


Figura 11.- Perfiles topográficos del municipio de Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco.

De acuerdo con Acevedo-Sandoval *et al.* (2010), la acidificación de los suelos puede presentarse durante la pedogénesis; el resultado depende de la interrelación de los diferentes factores y procesos de formadores del suelo (Jenny, 1941; Huang *et al.*, 2010). En este sentido, probablemente el estudio de génesis de los suelos ayudaría a explicar la forma en cómo se distribuye el pH en el área de estudio; no obstante,

en nuestra investigación no se realizó este tipo de análisis. Por otra parte, la actividad humana como vector en los procesos de formación del suelo (Dudal, 2005; Yescas *et al.*, 2018), también podría estar influyendo en la distribución de este parámetro; así como de la MO.

La presencia de pH fuertemente ácidos y la acumulación de MO, puede estar relacionado con el efecto que el pH tiene sobre la descomposición de la MO, ya que en suelos fuertemente ácidos este proceso es más lento (Batty y Younger, 2007; Sellan *et al.*, 2020). Lo cual, probablemente esté asociado al uso agrícola que tienen los suelos en el área de estudio; ya que, el cultivo de maíz (principal cultivo) se fertiliza principalmente con urea (hasta 350 kg por ciclo). De acuerdo con Zang *et al.* (2016), la adición de fertilizantes nitrogenados desacelera la alteración de MO; debido a la disminución de la actividad microbiana (Keeler *et al.*, 2009; Frey *et al.*, 2014); sin embargo, este tema no se abordó en este estudio.

#### **6.4 Verificación de los mapas de pH y MO**

La precisión de los mapas de pH y MO fue similar, acorde con la validación cruzada, que en ocasiones subestimó o sobreestimó el valor de campo (Cuadro 4), por lo que los dos mapas tuvieron errores ( $RCME_{pH} = 0.1360$ ;  $RCME_{MO} = 0.0247$ ). En cambio, al analizar los *EMS* se obtiene que los mapas subestimaron los valores de campo, al presentar valores negativos (Guzmán-Martínez *et al.*, 2013). Los valores de la RCME indica que los dos mapas tuvieron un buen desempeño, ya que sus valores estuvieron cercanos a cero (Soto-Bravo y González-Lutz, 2018), aunque el mapa de MO tuvo el mejor desempeño.

Cuadro 4. Precisión de los mapas de pH y MO del municipio de Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco.

No.	UTM		pH <sub>p</sub>	MO <sub>p</sub> <sup>†</sup> (%)	pH <sub>m</sub>	MO <sub>m</sub> (%)	RCME <sub>pH</sub>	EMS <sub>pH</sub>	RCME <sub>MO</sub>	EMS <sub>MO</sub>
	X	Y								
1	664920.65	2271661.37	5.1	2.08	5	2.1	0.01	0.1	0.0004	-0.02
2	676133.37	2266878.02	4.8	2.49	4.9	2.43	0.01	-0.1	0.0036	0.06
3	650569.22	2263984.94	5.8	2.09	5.6	2.09	0.04	0.2	0.0000	0.00
4	673606.72	2256021.20	5.4	2.48	5.3	2.45	0.01	0.1	0.0009	0.03
5	663437.28	2265538.90	5.2	2.18	5.1	2.2	0.01	0.1	0.0004	-0.02
6	658798.63	2264621.05	5.2	2.17	5.3	2.16	0.01	-0.1	0.0001	0.01
7	672989.55	2271684.21	4.1	2.13	4.0	2.14	0.01	0.1	0.0001	-0.01
8	662276.22	2262246.46	5.2	2.49	5.2	2.51	0.0	0.0	0.0004	-0.02
9	661783.77	2275120.23	5.3	1.96	5.4	1.95	0.01	-0.1	0.0001	0.01
10	668505.11	2273387.02	5.0	2.12	5.0	2.13	0.0	0.0	0.0001	-0.01
11	672275.42	2271658.09	4.9	2.13	5.2	2.10	0.09	-0.3	0.0009	0.03
12	651688.55	2270674.82	6.1	1.55	6.2	1.57	0.01	-0.1	0.0004	-0.02
13	668691.96	2254534.82	5.4	2.29	5.2	2.26	0.04	0.2	0.0009	0.03
14	649245.32	2266025.91	5.9	1.89	5.8	1.93	0.01	0.1	0.0016	-0.04
15	668604.83	2260668.87	5.3	2.18	5.2	2.17	0.01	0.1	0.0001	0.01
16	649088.88	2264952.88	5.9	1.97	5.9	1.97	0.0	0.0	0.0000	0.00
17	656660.17	2263242.46	5.2	2.09	5.4	2.06	0.04	-0.2	0.0009	0.03
18	650581.10	2269980.41	5.8	1.58	5.7	1.56	0.01	0.1	0.0004	-0.02
19	674992.49	2264123.18	4.9	2.66	4.8	2.63	0.01	0.1	0.0009	0.03
20	676930.89	2265449.97	4.9	2.69	4.7	2.7	0.04	0.2	0.0001	-0.01
17							0.1360	0.0250	0.0247	0.0055

<sup>†</sup>MO<sub>p</sub>: materia orgánica predicha.

## 7. Conclusiones

El método geoestadístico kriging Ordinario permitió establecer la variabilidad espacial del pH y MO, así como su distribución en el espacio, y obtener modelos de predicción de estas variables. El análisis estructural del pH y MO determinó que el pH tiene mayor predicción que MO, ya que el grado de variación espacial de pH (33.3%) fue mayor que MO (26.2%), situación que se manifestó en las validaciones cruzadas, donde el error del modelo de predicción de pH (0.7885) fue menor que el de MO (0.8340) y como se constató con la verificación de la precisión de los mapas. Los mapas de predicción mostraron la distribución del pH y MO. La manera como se distribuyeron los valores de pH y MO, se relacionó con los factores de formación del suelo como el material parental, la fisiografía y la biota; dentro de la biota, el factor humano influye con las actividades agrícolas, principalmente a través de la fertilización nitrogenada, lo que puede provocar el aumento de la acidez de los suelos y el incremento de los porcentajes de la MO. Sin embargo, requiere realizar un estudio de génesis de suelo para evidenciar el efecto de los factores formadores del suelo en la variabilidad espacial del pH y MO.

## 8.- Bibliografía

- Acevedo-Sandoval, O. A., L. E. Ortiz-Hernández, D. Flores-Román, A. S. Velásquez-Rodríguez y K. Flores-Castro. 2003. Caracterización física y química de horizontes endurecidos (tepetates) en suelos de origen volcánico del Estado de México. *Agrociencia* 37: 435-449.
- Acevedo-Sandoval, O., M. A. Valera-Perez y F. Prieto-García. 2010. Propiedades físicas, químicas y mineralógicas de suelos forestales en Acaxochitlan, Hidalgo, México. *Universidad y ciencia* 26: 137-150.
- Alemán-Montes, B., A. Búcaro-González, C. Henríquez-Henríquez y K. Largaespada-Zelaya. 2019. Mapeo digital de suelos agrícolas en la región occidental del Valle Central de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 43: 157-166.
- Batty, L.C. and P. L. Younger. 2007. The effect of pH on plant litter decomposition and metal cycling in wetland mesocosms supplied with mine drainage. *Chemosphere* 66: 158-164.
- Benton, J. J. Jr. 2003. *Agronomic handbook. Management of crops, soils, and their fertility.* CRC PRESS. Boca Raton. London. New York. Washington, D.C. USA. 450 p.
- Blanco-Canqui, H., T. M. Shaver, J. L. Lindquist, C. A. Shapiro, R. W. Elmore, C. A. Francis and G. W. Hergert. 2015. Cover crops and ecosystem services: insights from studies in temperate soils. *Agronomy Journal* 107: 2449-2474. doi:10.2134/agronj15.0086
- Cenicafe. (2016). La acidez del suelo, una limitante común para la producción de café. *Avances Técnicos Cenicafé*, 466(12), 1–12. <https://doi.org/0120-0178>
- Cremona, M. V., & Enriquez, A. S. (2020). *Algunas propiedades del suelo que condicionan su comportamiento: El pH y la conductividad eléctrica.* EEA Bariloche.

- Cristóbal-Acevedo, D., E. Hernández-Acosta, R. Maldonado-Torres y M.E. Álvarez-Sánchez. 2015. Variabilidad espacial del carbono en un suelo después de 10 años de retiro e incorporación de residuos de cosecha. *Terra Latinoamericana* 33: 199-208.
- Dewis, J. y F. Freitas. 1970. Métodos físicos y químicos de análisis de suelos y aguas. p. 36-57. *Boletín Sobre Suelos* N° 10. FAO, Roma, Italia.
- Dorić, D., E. Nikolić-Dorić, V. Jevremović and J. Mališić. 2009. On measuring skewness and kurtosis. *Qual Quant* 43: 481-493. doi:10.1007/s11135-007-9128-9
- Douglas, E. M., J. M. Jacobs, D. M. Sumner and R. L. Ray. 2009. A comparison of models for estimating potential evapotranspiration for Florida land cover types. *Journal of Hydrology* 373: 366-376.
- Dudal, R. 2005. The sixth factor of soil formation. *Eurasian Soil Science c/c of Pochvovedenie* 38: S60.
- Eastman, J. R. 2013. *IDRISI Guide to GIS and Image Processing in Idrisi Selva*. Worcester, Clark University 306 p.
- Elbasiouny, H., M. Abowaly, A. A. Alkheirb and A. A. Gad. 2014. Spatial variation of soil carbon and nitrogen pools by using ordinary Kriging method in an area of north Nile Delta, Egypt. *Catena* 113: 70-78.
- Environmental Systems Research Institute (ESRI). 2014. *ArcGis 10.3. Working with the ArcMap Spatial Analyst*: California, ESRI Educational Services.
- Frey S. D., S. Ollinger, K. Nadelhoffer, R. Bowden, E. Brzostek, A. Burton, B. A. Caldwell, S. Crow, C. L. Goodale, A. S. Grandy, A. Finzi, M. G. Kramer, K. Lajtha, J. LeMoine, M. Martin, W. H. McDowell, R. Minocha, J. J. Sadowsky, P. H. Templer and K. Wickings. 2014. Chronic nitrogen additions suppress decomposition and sequester soil carbon in temperate forests. *Biogeochemistry* 121: 305-316. doi:10.1007/s10533-014-0004-0
- Gallardo, A. 2006. Geostadística. *Ecosistemas* 15: 48-58.

Garbanzo-León, G., B. Alemán-Montes, A. Alvarado-Hernández, C. Henríquez-Henríquez. 2017. Validación de modelos geoestadísticos y convencionales en la determinación de la variación espacial de la fertilidad de suelos del Pacífico Sur de Costa Rica. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía 93: 20-41.

García, E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. México, Instituto de Geografía-UNAM 98 p.

Geomática-Jalisco. 2018. Actualización del atlas municipal de riesgos por amenazas naturales y antrópicas en el municipio de Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco. Mapa geológico. <https://tlajomulco.gob.mx/ProteccionCivil/1.1.7%20MAPA%20GEOL%C3%93GICO.pdf>, consultado 20 diciembre 2019.

Guzmán-Martínez, O., J. V. Baldión-Rincón, O. Simbaqueva-Fonseca, H. J. Zapata y C. Chacón-Cardona. 2013. Coeficientes para estimar la radiación solar global a partir del brillo solar en la zona cafetera colombiana. Cenicafé 64: 60-76.

Ibarra-Castillo, D., J. A. Ruiz-Corral, D. R. González-Eguiarte, J. G. Flores Garnica y G. Díaz-Padilla. 2009 Distribución espacial del ph de los suelos agrícolas de Zapopan, Jalisco, México. Agricultura Técnica en México 35: 267-276.

Instituto de Información Estadística y Geografía de Jalisco (IIEG-Jalisco). 2018a. Recursos Cartográficos/Geología. <https://iieg.gob.mx/contenido/Municipios/TlajomulcodeZuniga.pdf>, consultado 15 diciembre 2019.

Instituto de Información Estadística y Geografía de Jalisco (IIEG-Jalisco). 2018b. Recursos Cartográficos/Suelos, Vegetación y Uso del suelo. <https://iieg.gob.mx/contenido/Municipios/TlajomulcodeZuniga.pdf>, consultado 15 diciembre 2019.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e informática (INEGI). 2019. Sistema de descarga de productos digitales, disponible en

<http://www.beta.inegi.org.mx/temas/ mapas/topografico/>, consultado 10 diciembre 2019.

Jaramillo, D. F. 2012. Variabilidad espacial del suelo, bases para su estudio. Revista de la Facultad de Ciencias Universidad Nacional de Colombia 1: 73-87.

Julca Otiniano, A., Meneses Florian, L., Blas Sevillano R. y Bello Amez S.(2006). IDESIA. Vol. 24 N°1. Pag. 49-61.

Keeler B. L., S. E. Hobbie and L. E. Kellogg. 2009. Effects of long-term nitrogen addition on microbial enzyme activity in eight forested and grassland sites: implications for litter and soil organic matter decomposition. Ecosystems 12: 1-15.

Malone, B., B. Minasny, A. McBratney. 2017. Using R for Digital Soil Mapping. Switzerland, Springer. 262 p.

Martínez, B. y Rodríguez, S. (2010). Evaluar la aplicación de cuatro fuentes de materia orgánica en el cultivo de amaranto (*amaranthus spp.*) en dos localidades de la provincia de Cotopaxi. Tesis de Licenciatura. Recuperado de <http://repositorio.utc.edu.ec/bitstream/27000/944/1/T-UTC-1240.pdf>

Minitab Inc®. 2013. Minitab Inc.: State Collage, Minitab Inc.

Motomiya, A. V. A., J. P. Molin, W. R. Motomiya and S. R. Vieira. 2011. Spatial variability of soil properties and cotton yield in the Brazilian Cerrado. Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambient. 15: 996-1003.

Navarro Pedreño, J., Moral Herrero, Gomez, L. y Mataix, B.(1995). Residuos orgánicos y agricultura. Universidad de Alicante. España.

Palacio, G., & Durango, M. (2019). Universidad Autónoma Chapingo IV Congreso Internacional y XV Congreso Nacional sobre Recursos Bióticos de Zonas Áridas “Innovaciones para mitigar sequía y desertificación.”

- Pingguo, Y., J. M. Byrne y M. Yang. 2016. Spatial variability of soil magnetic susceptibility, organic carbon and total nitrogen from farmland in northern China. *Catena* 145: 92-98.
- Prasad Rajendra y Power James F., (1997), *Soil Fertility Management for Sustainable Agriculture*. CRC Press.
- Rojas Nerhot, P.; Ramirez Monzòn, D.; Rasche Alvarez J. y Encina Rojas, A. (2018). Niveles de materia organica en distintos tipos de manejos. *Brazilian Journal of Development*. Vol. 4, n. 7. Pag. 3789-3800.
- Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2002. Norma Oficial Mexicana que establece las Especificaciones de Fertilidad, Salinidad y Clasificación de Suelos. Estudios, Muestreos y Análisis (NOM-021-RECNAT-2000). México, Diario Oficial de la Federación, 31 de diciembre, 2002. 85 p.
- Segura-Castruita, M. A., A. Huerta-García, M. Fortis-Hernández, J.A. Montemayor-Trejo, L. Martínez-Corral y P. Yescas-Coronado. 2014. Cartografía de la probabilidad de ocurrencia de *Atriplex canescens* en una región árida de México: *Agrociencia* 48: 639-652.
- Sellan, G., J. Thomson, N. Majalap, R. Robert and F. Q. Brearley. 2020. Impact of soil nitrogen availability and pH on tropical heath forest organic matter decomposition and decomposer activity. *Pedobiología-Journal of Soil Ecology* 80: 150645.
- SEMARNAT. (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-0210RECNAT-2000. Diario Oficial de La Federación.
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN). 2015. Normales climatológicas Periodos 1951-2010 y 1981-2000. Servicio Meteorológico Nacional. Disponible en <http://smn.cna.gob.mx>, consultado 10 diciembre 2019.

- Soto-Bravo, F. y M. I. González-Lutz. 2018. Análisis de métodos estadísticos para evaluar el desempeño de modelos de simulación en cultivos hortícolas. *Agronomía Mesoamericana* 30: 517-534.
- Trinidad Santos, A. y Velazco Velasco, J. 2016. Importancia de la materia orgánica en el suelo. *Agroactividad*. Vol 9 N°8. Pag 52-58.
- Umakant Mishra, U., D. A. N. Ussiri, R. Lal. 2010. Tillage effects on soil organic carbon storage and dynamics in corn Belt of Ohio USA. *Soil y Tillage Research* 107: 88-96.
- Valle, S. R., J. Carrasco, D. Pinochet y R. MacDonald. 2014. Variabilidad espacial y temporal de la disponibilidad de nutrientes y la condición de acidez de suelos volcánicos. *Agro sur* 42: 15-22.
- Venegas, A. 2008. Caracterización de la materia orgánica de suelos de praderas naturales y cultivadas de la IX Región. Tesis. Recuperado de [http://repositorio.uchile.cl/tesis/uchile/2008/qf-venegas\\_a/pdfAmont/qf-venegas\\_a.pdf](http://repositorio.uchile.cl/tesis/uchile/2008/qf-venegas_a/pdfAmont/qf-venegas_a.pdf)
- Videla, C., Baquero, V., Studdert, G.A., Zamuner, E., Picone, L. 2020. Acidez y exportación de bases en suelos bajo uso agrícola. *Latinoamérica unida protegiendo sus suelos*
- Villatoro, M., C. Henríquez y F. Sancho. 2008, Comparación de los interpoladores IDW y Kriging en la variación espacial de pH, Ca, CICE y P del suelo. *Agronomía Costarricense* 32: 95-105.
- Walkley, A. and C. A. Black. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of chromic acid titration method. *Soil Science* 37: 29-38.
- Weil, R. R. and N. C. Brady. 2017. *The Nature and Properties of Soils*. 15th edition. Pearson Education Limited. London, England. 1104 p.

- Wershaw, R. L. (1983). Humus chemistry: Genesis, composition, reactions. In *Organic Geochemistry* (Vol. 4, Issues 3–4, p. 223). [https://doi.org/10.1016/0146-6380\(83\)90043-8](https://doi.org/10.1016/0146-6380(83)90043-8)
- Wiesmeier, M., L. Urbanski, E. Hobbey, B. Lang, M. Lützw, B. Wesemael, E. Rabot, M. Lieb, N. Garcá-Franco, U. Wollschläger, H. Vogel and I. Kögel-Knabner. 2019. Soil organic carbon storage as a key function of soils. A review of drivers and indicators at various scales. *Geoderma* 333: 149-162
- Yamamoto, J. K. and P. M. B. Landim. 2013. *Geoestatística: conceitos e aplicações*. São Paulo: Oficina de Textos. 215 p.
- Yescas-Coronado, P., V. P. Álvarez-Reyna, M. Á. Segura-Castruita, M. García-Carrillo, V. Hernández-Hernández, G. González-Cervantes. Variabilidad Espacial del Carbono Orgánico e Inorgánico del Suelo en la Comarca Lagunera, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 70: 591-610. <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2018v70n3a2>
- Zang, H., J. Wang and Y. Kuzyakova. 2016. N fertilization decreases soil organic matter decomposition in the rhizosphere. *Applied Soil Ecology* 108: 47-53.
- Zarazúa-Villaseñor, P., D. R. González-Eguiarte, R. Nuño-Romero, J. A. Ruiz-Corral y J. P. Torres-Morán. 2007. Variabilidad espacial del pH del suelo en tres parcelas agrícolas. *Terra Latinoamericana* 25: 203-210.
- Zúñiga, F., M. Buenaño y D. Risco. 2016. Caracterización física y química de suelos de origen volcánico con actividad agrícola, próximos al volcán Tungurahua. *Revista Ecuatoriana de Investigaciones Agropecuarias* 1: 5-10. [doi.org/10.31164/reiagro.v1n1.2](https://doi.org/10.31164/reiagro.v1n1.2).