



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

**Análisis fisicoquímicos y de metales pesados biodisponibles
en suelos de la ribera del río Prieto en Coronango, Puebla**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE
LICENCIADO EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

PRESENTA:

MIGUEL ÁNGEL VILLALOBOS CÓRDOVA

DIRECTOR:

MC. MARÍA NOEMI BONILLA Y FERNÁNDEZ

CO-DIRECTORA:

DRA. SONIA EMILIA SILVA GÓMEZ

H. Puebla Z., Diciembre de 2019

BUAP

Este trabajo de tesis fue desarrollado a través de los programas de la Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado: proyectos VIEP 2016 y 2017 registrados con el nombre **Evaluación física y química del agua y suelos de la ribera del río Prieto en Coronango, Puebla.**

El trabajo fue presentado en la modalidad de exposición oral por el autor de tesis en:

El **XV Congreso Internacional y XXI Congreso Nacional de Ciencias Ambientales**, Celebrado en la ciudad de Oaxaca, Oaxaca, en junio del 2016 en el Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca.

El **XVI Congreso Internacional y XXII Congreso Nacional de Ciencias Ambientales**, Celebrado en la ciudad de Chetumal, Quintana Roo, en junio del 2017 en la Universidad de Quintana Roo.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a Dios, por darme sabiduría y fortaleza para poder llegar hasta este día y siempre guiarme por buen camino.

A mis Padres: María Antonieta Córdova Díaz y Miguel Ángel Villalobos Candia. A quienes agradezco los valores que me han inculcado, su sacrificio y apoyo constante en mi vida y desarrollo profesional pues sin su presencia no habría logrado llegar a este momento.

Debo agradecer de manera especial a la M.C. Noemí Bonilla y Fernández asesora de tesis, por haberme exhortado a participar en proyectos de investigación por los cuales se desarrolló esta tesis. Agradezco infinitamente su tutela, su dedicación, paciencia y por compartir tantos conocimientos conmigo; pero sobre todo agradezco su motivación, amistad y el apoyo incondicional que me brindó en cualquier aspecto que yo necesitara.

A la Dra. Sonia Emilia Silva Gómez y al Dr. Fernando Hernández Aldana por su importante aporte y participación en el desarrollo de esta tesis. También a la Dra. J. Deisy Santamaría Juárez y a la M.I. Mayté Juárez Meneses por su apoyo para la revisión de esta tesis, por su tiempo invertido, sus observaciones y sugerencias.

A mis amigos más cercanos Omar Vázquez y Ernestina Alonso por brindarme su valiosa amistad y por los buenos momentos que compartimos juntos durante este tiempo.

Y a mi novia Dahamar Morales que estuvo a mi lado en los momentos y situaciones más tormentosas siempre motivándome y ayudándome hasta donde te fue posible.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	8
JUSTIFICACIÓN	9
OBJETIVOS	10
General	10
Específicos	11
HIPÓTESIS	11
CAPÍTULO I	11
1. MARCO TEÓRICO	11
1.1. AGUA	11
1.1.1. Situación del agua en México y el mundo	11
1.1.2. Recursos hídricos del estado de Puebla	13
1.1.3. Contaminación del agua	15
1.1.3.1. Tipos de contaminación	16
1.1.3.1.1. Contaminación local	16
1.1.3.1.2. Contaminación difusa	17
1.2. SUELO	17
1.2.1. Contaminación del suelo	19
1.2.2. Propiedades del suelo	20
1.2.2.1. Propiedades físicas del suelo	20
1.2.2.1.1. Densidad aparente	20
1.2.2.1.2. Densidad real	21
1.2.2.1.3. Porosidad	21
1.2.2.1.4. Contenido de humedad	22
1.2.2.1.5. Textura	23
1.2.2.1.6. Color	24
1.2.2.2. Propiedades químicas del suelo	24
1.2.2.2.1. pH (potencial hidrógeno)	24
1.2.2.2.2. Materia orgánica	25
1.2.2.2.3. Nitrógeno	26
1.2.2.2.4. Fósforo	27
1.2.2.2.5. Capacidad de intercambio catiónico y cationes intercambiables	27
1.2.2.2.6. Micronutrientes y metales pesados	31
1.2.2.2.7. Conductividad eléctrica	36
1.2.2.2.8. Aniones solubles	37
1.3. SISTEMAS RIBEREÑOS	39
1.3.1. Erosión por corrientes de agua	41
CAPÍTULO II	42
2. METODOLOGÍA	42
2.1. ZONA DE ESTUDIO	42
2.1.1. Coronango	42

2.2. MUESTREO DE SUELOS _____	44
2.3. PARÁMETROS DETERMINADOS _____	46
2.3.1. Preparación de la muestra _____	47
2.3.2. pH medido en agua _____	48
2.3.3. Densidad aparente _____	48
2.3.4. Densidad real _____	49
2.3.5. Contenido de humedad del suelo _____	50
2.3.6. Contenido de materia orgánica _____	50
2.3.7. Nitrógeno total _____	51
2.3.8. Determinación de la textura del suelo (AS-09) _____	52
2.3.9. Determinación del fósforo extraíble (AS-11) _____	53
2.3.10. Determinación de la capacidad de intercambio catiónico total, CICT _____	53
2.3.11. Determinación de cationes intercambiables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+) _____	54
2.3.12. Determinación de micronutrientes y metales contaminantes (AS-14) _____	55
2.3.13. Determinación del contenido de boro (AS-15) _____	56
2.3.14. Medición de la conductividad eléctrica (AS-19) _____	57
2.3.15. Determinación de aniones solubles en el extracto de saturación (AS-20) _____	57
CAPÍTULO III _____	58
3. RESULTADOS Y DISCUSIONES _____	58
3.1. RESULTADOS POR PARÁMETRO DETERMINADO _____	59
3.1.1. Resultados de pH _____	59
3.1.2. Resultados de densidad aparente _____	60
3.1.3. Resultados de densidad real _____	61
3.1.4. Resultados de porcentaje de porosidad _____	62
3.1.5. Resultados de contenido de humedad del suelo _____	63
3.1.6. Resultados de contenido de materia orgánica _____	64
3.1.7. Resultados de nitrógeno total _____	65
3.1.7. Resultados de textura _____	66
3.1.8. Resultados de fósforo extraíble _____	67
3.1.9. Resultados de capacidad de intercambio catiónico total (CICT) _____	68
3.1.10. Resultados de cationes intercambiables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+) _____	70
3.1.11. Resultados de micronutrientes y metales pesados biodisponibles _____	72
3.1.12. Resultados de contenido de boro _____	75
3.1.13. Resultados de conductividad eléctrica _____	77
3.1.14. Resultados de aniones solubles en el extracto de saturación _____	78
3.1.15. Resultados de color del suelo _____	80
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES _____	81
BIBLIOGRAFÍA _____	83

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Coordenadas de las estaciones de muestreo en el río Prieto.....	44
Cuadro 2. Determinaciones físicas y químicas realizadas de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000.....	46
Cuadro 3. Resultados obtenidos de pH.....	59
Cuadro 4. Resultados obtenidos de densidad aparente.....	60
Cuadro 5. Resultados obtenidos de densidad real.....	61
Cuadro 6. Resultados obtenidos de porosidad.....	62
Cuadro 7. Resultados de contenido de humedad.....	64
Cuadro 8. Resultados de materia orgánica.....	64
Cuadro 9. Resultados de Nitrógeno total.....	65
Cuadro 10. Resultados de Textura.....	67
Cuadro 11. Resultados de fósforo extraíble.....	68
Cuadro 12. Resultados de capacidad de intercambio catiónico total.....	69
Cuadro 13. Resultados de cationes intercambiables.....	70
Cuadro 14. Resultados obtenidos de metales pesados biodisponibles.....	73
Cuadro 15. Resultados de contenido de boro.....	75
Cuadro 16. Resultados de conductividad eléctrica.....	77
Cuadro 17. Resultados obtenidos de aniones solubles (cloruros, carbonatos y bicarbonatos).....	78
Cuadro 18. Resultados de color del suelo.....	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de las Estaciones de muestreo en el río Prieto, municipio de Coronango, Puebla.....	45
Figura 2. Comparación de los resultados de pH de las cinco estaciones de muestreo.....	59
Figura 3. Comparación de los resultados de densidad aparente de las cinco estaciones de muestreo.....	60
Figura 4. Comparación de los resultados de densidad real de las cinco estaciones de muestreo.....	61
Figura 5. Comparación de los resultados de porcentaje de porosidad de las cinco estaciones de muestreo.....	62
Figura 6. Comparación de los resultados de porcentaje de humedad de las cinco estaciones de muestreo.....	64
Figura 7. Comparación de los resultados de porcentaje de materia orgánica de las cinco estaciones de muestreo.....	64
Figura 8. Comparación de los resultados de porcentaje de nitrógeno de las cinco estaciones de muestreo.....	65
Figura 9. Comparación de los resultados de fósforo extraíble de las cinco estaciones de muestreo.....	68
Figura 10. Comparación de los resultados de CICT de las cinco estaciones de muestreo.....	69
Figura 11. Comparación de los resultados de cationes intercambiables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} y K^{+}) de las cinco estaciones de muestreo.....	71
Figura 12. Comparación de los resultados de metales pesados biodisponibles de las cinco estaciones de muestreo.....	74
Figura 13. Comparación de los resultados de boro extraíble de las cinco estaciones de muestreo.....	75
Figura 14. Comparación de los resultados de conductividad eléctrica de las cinco estaciones de muestreo.....	77
Figura 15. Comparación de los resultados de aniones solubles en el extracto de saturación de las cinco estaciones de muestreo.....	79

INTRODUCCIÓN

Un problema que en la actualidad está generando una gran preocupación a nivel mundial es la contaminación de los ríos que consiste en la incorporación al agua de materiales considerados como extraños, por ejemplo: productos químicos, microorganismos, aguas residuales, residuos sólidos urbanos e industriales, entre otros (Ibañez, 2012). Estos perjudican las características físicas, químicas y biológicas afectando la calidad del agua y a su vez la vida del medio circundante, haciéndola inútil para muchos de los usos que se llevan a cabo diariamente.

En Puebla se encuentra una cuarta parte de los ríos más contaminados de México. En el 2016 un estudio de la Comisión Nacional del Agua identificó 17 cuencas del país con niveles inaceptables de coliformes fecales, sólidos suspendidos totales y demanda tanto bioquímica como química de oxígeno, de las cuales cuatro de ellas se encuentran en el Estado. Se trata de los ríos Zahuapan, Alseseca, Nexapa y Atoyac, todos dentro de la cuenca de Alto Atoyac (Mena, 2017).

En los últimos años, el incremento de las actividades industriales y urbanas en el Estado de Puebla en ramas como: fabricación de sillas, lonas, mesas, reciclado de aluminio, cartón, madererías, cementeras y empresas automotrices; han ocasionado que en numerosos casos se afecte seriamente la calidad del agua y a su vez la de los sedimentos y riberas de algunos sistemas acuáticos, por ejemplo, ríos y lagos (Villalba *et al.*, 2013). Lo anterior se debe principalmente a la introducción de agua no tratada, proveniente de empresas y corredores industriales, a dichos sistemas con parámetros no aptos para su depuración. Estas actividades provocan daños a las características fisicoquímicas de los suelos del medio, afectando a la humanidad y las demás especies que se benefician de las mismas.

Coronango es uno de los 217 municipios que forman parte del Estado de Puebla, se ubica en la porción meridional de la cuenca del río Atoyac, una de las cuencas más importantes del Estado, donde nace el río Prieto el cual baña la porción oriental de norte a sur, atravesando la población para posteriormente unirse al río Atoyac

fuera del municipio. En la ribera del río destacan varios manantiales como: el Axoyocaxtla, Almoloca de Tlaltenango y Agua Santa. La mayor parte del territorio del municipio presenta zonas dedicadas a la agricultura de temporal (H. Ayuntamiento de Coronango, s.f.).

En el río Prieto existe un serio problema de contaminación debido a las descargas principalmente urbanas que este recibe de forma directa y a la inconsciencia de los mismos pobladores del municipio que arrojan residuos sólidos directamente al río, contaminando las aguas que conduce proveniente de los manantiales que se localizan a su alrededor, afectando a los habitantes de los alrededores por los malos olores y focos de infección que el río genera; aunado a esto, algunas zonas en las cercanías del río se dedican a la agricultura, donde se cultiva principalmente maíz, los que son regados generalmente con agua que proviene del río Prieto, (Orden Jurídico Poblano, 2018)

JUSTIFICACIÓN

La contaminación del río Prieto se está convirtiendo en un grave problema social en el municipio de Coronango, al grado de ocasionar problemas entre los mismos pobladores por los olores tan desagradables que ocasiona y las cantidades de residuos que son arrojados a la corriente del río por ellos mismos, lo que ha ocasionado asolvamiento de su corriente e inundaciones en la época de lluvia, aunado a esto, el agua del río Prieto es utilizada para el riego agrícola y está contaminando los suelos y cultivos que ahí se establecen. Tomando en cuenta lo anterior, el principal cuerpo receptor de toda carga de contaminantes acarreados por el agua es el suelo; sin embargo, esto no siempre implica una desventaja, debido a que el agua contaminada acarrea una concentración de nutrientes necesarios para el crecimiento de los cultivos como nitrógeno, fósforo, potasio y otros más; sin embargo, el transporte de metales pesados provenientes de drenajes pluviales de las poblaciones, material de construcción de los canales, desgaste de las herramientas usadas cotidianamente y que por van liberando metales que

tendrán como destino final las aguas de desecho, y por consecuencia se depositarán en los suelos que bañan los ríos, alterando las propiedades originales de los mismos ocasionando daños graves a los habitantes del lugar.

Por otro lado, desde el 2009 en Coronango, los habitantes que viven a los alrededores del río se quejan constantemente de los olores fuertes y desagradables que el río emana por la tarde, y por la gran cantidad de basura que este lleva como botellas de plástico, llantas, y otros desechos sólidos urbanos; que indican una contaminación muy alta, a tal grado que las quejas y fotografías que describen estos comentarios y acontecimientos se han emitido por algunas cadenas de televisión importantes del País. Además de que el río Prieto desemboca sus aguas al río Atoyac y con esto contribuye a su alta contaminación.

Actualmente en la ciudad de Puebla se han realizado algunas acciones para el rescate del río Atoyac, tomando en consideración para que en un futuro sea esto una realidad es imprescindible que también se evalué la contaminación de los sistemas acuáticos que arrojan sus aguas al río Atoyac para ir eliminando la contaminación en ellos y evitar con ello que siga contaminando a tan importante sistema acuático.

Por lo anteriormente mencionado fue imprescindible analizar algunas características físicas y químicas de los suelos de la ribera que son bañados con el agua del río Prieto para evaluar la forma en que son afectados por los contaminantes del agua del río y las descargas de aguas residuales urbanas.

OBJETIVOS

General

Analizar las concentraciones fisicoquímicas y de metales pesados biodisponibles: Cu, Cd, Fe, Hg y Pb en suelos de cinco estaciones de muestreo de la ribera del río Prieto en el municipio de Coronango, Puebla.

Específicos

- Determinar las concentraciones físicas y químicas en época de lluvia y secas de los suelos de la ribera: pH, densidad aparente, densidad real, humedad, materia orgánica, nitrógeno total, textura, fósforo extraíble, capacidad de intercambio catiónico, cationes intercambiables, conductividad eléctrica, boro y aniones solubles.
- Determinar las concentraciones de metales pesados biodisponibles: cadmio, cobre, hierro, mercurio y plomo por el método de absorción atómica.
- Establecer si existe contaminación por la influencia de las descargas de aguas residuales al río Prieto de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad, clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis.

HIPÓTESIS

Las características fisicoquímicas y la concentración de metales pesados biodisponibles de los suelos de la ribera del río Prieto están siendo alteradas por el agua contaminada del río y las descargas de aguas residuales que se arrojan en este.

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO

1.1. AGUA

1.1.1. Situación del agua en México y el mundo

El agua es uno de los elementos más comunes en la Tierra, en estado líquido se encuentra en lagos, ríos y presas, en depósitos subterráneos y ocupa los mares y océanos circundantes; en estado gaseoso se presenta como vapor de agua en la

atmósfera; y en estado sólido cubre las regiones polares y las montañas más altas en forma de hielo o nieve (SEMARNAT, 2007).

De acuerdo con las últimas estimaciones hay aproximadamente 1400 millones de km³ de agua en nuestro planeta y aunque el agua es el elemento más abundante en la Tierra, tan solo el 2.5% es agua dulce y el 97.5% es agua salada que se encuentra contenida en los mares y océanos.

Las aguas dulces del mundo constituyen un recurso natural escaso, amenazado e indispensable para la vida humana y el sostenimiento del medio ambiente que, como consecuencia del rápido desarrollo humano y económico, además del uso inadecuado que se ha hecho de ella, ha sufrido un alarmante deterioro.

De acuerdo con los estudios sobre los balances hídricos del planeta, solamente el 0.007% de las aguas dulces se encuentran realmente disponibles a todos los humanos (Toledo, 2012). En su mayoría, se encuentra en glaciares y capas de hielo, principalmente en Groenlandia y la Antártica. También una porción importante se halla atrapada en depósitos subterráneos profundos de difícil acceso y solo el 0.3% del agua dulce se encuentra en ríos, lagos y otros almacenamientos, disponible para ser usada por los seres vivos, incluyendo al hombre (SEMARNAT, 2007).

Según la UNESCO, cada día los ecosistemas acuáticos están siendo dañados de forma irreparable debido al crecimiento de la población y los esfuerzos del hombre para manejar el agua. Estas alteraciones se iniciaron con: la manipulación de los flujos de los grandes ríos, las presas de almacenamiento, el drenaje de los humedales, el transporte del agua a los centros urbanos, la conversión del uso de la tierra, introducción de especies exóticas, la explotación de los acuíferos, la irrigación de tierras agrícolas y la contaminación. La navegación, la agricultura, la industria, el desarrollo de infraestructuras, la generación de energía y los usos domésticos han sido las principales actividades económicas que dependen directamente del agua. Estas actividades antropogénicas han terminado por modificar los flujos de agua dulce de los principales ríos del mundo, cambiando sensiblemente las tasas de evaporación y la calidad de las aguas por el incremento sustancial de los desechos tóxicos (Toledo, 2012).

Cada día, dos millones de toneladas de desechos se vierten en los ríos. Desde el año de 1900 ha desaparecido el 50% de los humedales del mundo, así como una gran cantidad de especies de peces, pájaros y mamíferos (UNESCO, 2003). Además, se plantea que a medida que crece la población mundial, la presión ejercida sobre los recursos hídricos sea mayor. Diversos estudios muestran que, durante el siglo pasado, la población mundial se triplicó, mientras que el consumo de agua se sextuplicó.

Las más recientes evaluaciones de especialistas y organizaciones internacionales conectadas con los problemas del agua sugieren que para el año 2025 más de dos terceras partes de la humanidad sufrirá algún estrés por la falta de este líquido (Toledo, 2012). Además, se prevé que para el año 2050, que una de cada cuatro personas vivirá en un país afectado por la escasez de agua dulce crónica o recurrente.

Asimismo, si se considera que cada litro de agua residual contamina al menos 8 litros de agua dulce, se estima que, anualmente unos 12,000 km³ de recursos hídricos del planeta no están disponibles para su aprovechamiento. En la actualidad, solo el 10% de las aguas residuales domésticas son recolectadas en los países en vías de desarrollo y sólo el 10% de las plantas de tratamiento de aguas residuales existentes operan de manera fiable y eficiente (UNESCO, 2006).

1.1.2. Recursos hídricos del estado de Puebla

El estado de Puebla tiene importantes fuentes de agua superficial y subterránea, se pueden identificar cuatro regiones hidrológicas: Pánuco al noroeste, Tuxpan-Nautla al norte, Papaloapan al este y sureste, y Balsas en el centro del estado. De acuerdo con CONAGUA en el 2009 los usos del agua se destinaron a: agricultura (1,962 hm³), abastecimiento público (385 hm³), industria autoabastecida (35.2 hm³) y energía eléctrica excluyendo hidroelectricidad (6.5 hm³).

En el estado, 24.84% del agua destinada a los diferentes usos proviene de mantos acuíferos y el 75.16% de fuentes superficiales. De acuerdo con el balance

hidrológico global para el estado, hecho por la CONAGUA se estima que la cantidad total de agua que ingresa, así como el volumen que sale del estado o se pierde revela un excedente disponible de agua superior a los 5,000 mm³ anuales. Sin embargo, este volumen no se encuentra uniformemente distribuido, pues mientras algunas zonas, como la Sierra Norte, cuentan con abundantes corrientes de agua superficiales, en la porción sur y área de la mixteca son escasas, de poco caudal y casi totalmente aprovechadas, aunque presentan problemas de contaminación. (González, Domínguez, Cruz, y Arriaga, 2011).

Puebla cuenta con diecinueve acuíferos, de los cuales dos se encuentran sobreexplotados: el del Valle de Tecamachalco de la cuenca del río Atoyac y el de Tepalcingo-Axochiapan, de la cuenca del río Amacuzac. Además de la sobreexplotación, el estado de Puebla presenta casos muy importantes de contaminación en los ríos Alseseca y Atoyac resultado de las descargas de aguas residuales que provienen de las actividades económicas principalmente la industria en sus diferentes ramos y los servicios. Además, también se ha detectado que las aguas residuales que fluyen por el drenaje de Valsequillo contienen metales pesados como zinc, plomo, cobre, níquel, selenio, cadmio, cromo y mercurio.

Otro caso grave de contaminación es la que presenta el río Alseseca, el cual se ha convertido en un receptor de desechos sólidos y de descargas de aguas residuales municipales e industriales, que provocan degradación, contaminación, afecciones a la flora y fauna, además de propiciar el desequilibrio de los ecosistemas y problemas en la salud de las poblaciones aledañas. La comisión Estatal del Agua y Saneamiento de Puebla identifican algunos problemas en el abastecimiento de agua potable, como distribución no uniforme, falta de disponibilidad de aguas superficiales por estar concesionadas en su mayoría para uso agrícola. Por último, de acuerdo con su ubicación geográfica, Puebla se encuentra sujeta a fenómenos hidrometeorológicos extremos que han provocado efectos devastadores. (González, Domínguez, Cruz, y Arriaga, 2011)

1.1.3. Contaminación del agua

La contaminación del agua es la acción o el efecto originado por la introducción o la presencia de materiales (naturales o sintéticos) o condiciones extrañas al agua que, al rebasar la capacidad del ecosistema para asimilarlo y/o degradarlo alteran el equilibrio ecológico de la zona y perjudican su calidad en relación con sus usos posteriores o sus servicios ambientales. (Flores *et al.*, 1995).

El agua pura es un recurso renovable, sin embargo, puede llegar a estar tan contaminada por las actividades humanas, que ya no sea útil, sino más bien nocivo. El crecimiento de la industrialización, de la urbanización y de la población humana acrecienta los problemas de contaminación y en consecuencia el suministro de agua potable y el tratamiento de las aguas cloacales. (Martínez *et al.*, 2009).

Los ríos y lagos se contaminan porque en ellos son vertidos los productos de desecho de las áreas urbanas y de las industrias. El agua potable, para que pueda ser utilizada para fines alimenticios debe estar totalmente limpia, ser insípida, inodora e incolora y tener una temperatura aproximada de 15°C; no debe contener bacterias, virus, parásitos u otros gérmenes que provoquen enfermedades, además, el agua potable no debe exceder en cantidades de sustancias minerales mayores de los límites establecidos. (Martínez *et al.*, 2009).

Según la CONAGUA (2004) los principales contaminantes del agua son: Los agentes patógenos, bacterias, virus, protozoarios, parásitos que entran al agua provenientes de desechos orgánicos, las sustancias químicas inorgánicas, ácidos, compuestos de metales tóxicos, nutrientes vegetales que pueden ocasionar eutrofización; sustancias químicas orgánicas, petróleo, plásticos, plaguicidas, detergentes, sedimentos o materia suspendida y partículas insolubles de suelo que enturbian el agua y que son la mayor fuente de contaminación. Las sustancias radiactivas que pueden causar defectos congénitos y cáncer. El calor y los ingresos de agua caliente, que disminuyen el contenido de oxígeno y hace a los organismos acuáticos muy vulnerables.

1.1.3.1. Tipos de contaminación

Atendiendo al modo en el que la contaminación se produce, podemos distinguir la proveniente de fuentes claramente delimitadas (contaminación local o puntual) y la causada por fuentes difusas (no puntuales) (Martínez *et al.*, 2005).

La contaminación del agua también puede clasificarse de acuerdo con su temporalidad, denominándose continuas o intermitentes. Las fuentes continuas son aquellas que constantemente están produciendo solutos que se liberan al medio; mientras que, las fuentes intermitentes o de pulso son aquellas que se originan durante una contingencia, como accidentes químicos o derrames, los cuales producen percolaciones y una entrada única de contaminantes al sistema acuífero.

Además, dado que existen procesos antropogénicos y naturales las fuentes también se clasifican por su origen de la misma manera. El origen es importante dadas las implicaciones que tiene con los mecanismos de transporte y de ser el caso, en los programas de remediación. (Hernández, 2012). La contaminación natural consiste en la presencia de determinadas sustancias en el agua sin que intervenga la acción humana, como: partículas sólidas y gases atmosféricos arrastrados por la lluvia y aguas del deshielo, polen, esporas, hojas secas y otros residuos vegetales. Por otro lado, la contaminación antrópica es la que representa mayores efectos de contaminación a pesar de que cuantitativamente son menores que las naturales. Por ejemplo: la contaminación de origen urbano mediante aguas residuales urbanas (ARU); actividades productivas como la agricultura, ganadería y la industria; y otras actividades relacionadas a vertederos, quema de combustibles, uso de lubricantes, aceites, etc.

1.1.3.1.1. Contaminación local

La contaminación local o puntual aparece en zonas que rodean a la fuente contaminante en las que existe una relación directa con el origen de la contaminación. Es decir, es producida por un foco emisor determinado afectando a una zona concreta, lo que permite una mejor difusión del vertido. Su detección y su

control son relativamente sencillos, va unida generalmente a la minería, las instalaciones industriales, los vertederos y otras instalaciones, tanto en funcionamiento como tras su cierre. Dichas prácticas pueden suponer un riesgo tanto para el agua como para el suelo (Martínez *et al.*, 2005). Suele afectar más a zonas de alta densidad urbana con larga tradición de industrias.

Se consideran fuentes puntuales a las fábricas, refinerías, tintorerías, gasolineras, aeropuertos, tiraderos de basura, tanques enterrados, plantas de tratamiento de aguas negras, minas, pozos petroleros, así como derrames que suceden al transportar compuestos químicos, entre otras. (Martínez *et al.*, 2009).

1.1.3.1.2. Contaminación difusa

La contaminación difusa está causada generalmente por el transporte de sustancias contaminantes, tanto solubles como particuladas, a lo largo de amplias zonas con frecuencia alejadas de la fuente de origen (la cual puede no estar claramente definida) en las que coexisten múltiples focos de emisión, lo que dificulta el estudio de los contaminantes y su control individual; además, pueden producirse interacciones que agraven el problema. Pueden ser metales pesados, sustancias acidificantes, sobrecarga de nutrientes (eutrofización), etc, (Martínez *et al.*, 2005).

Como ejemplos de fuentes no puntuales o difusas se consideran la aplicación de plaguicidas en zonas agrícolas, los canales de drenaje, los sistemas de tuberías para el transporte de hidrocarburos, entre otros. (Hernández, 2012).

1.2. SUELO

El suelo es una delgada capa que cubre la mayor parte de la superficie terrestre. Esta capa, cuyo espesor varía entre unos pocos centímetros y 2 o 3 metros, puede parecer insignificante comparada con la masa de nuestro planeta. Sin embargo, en esos pocos centímetros, los reinos vegetal y animal se encuentran con el mundo mineral y establecen con él una relación dinámica (Thompson y Troeh, 1998).

El suelo proviene de la desintegración o alteración física y química de las rocas y de los residuos de las actividades de los seres vivos que se asientan sobre él además de estar condicionado por factores como el clima, organismos, relieve, litología, etc. Está constituido por tres fases interrelacionadas, la fase sólida, la fase líquida y la fase gaseosa. Estas están en constante evolución y el hombre interfiere en esa evolución alterando el equilibrio, ya sea por acciones agroforestales, por contaminación o por ocupación (Arias, 2001).

El origen de la palabra suelo proviene del latín *solum*, que significa base o fondo. El término suelo ha sido definido de diferentes maneras, ya sea que dicha definición provenga del geólogo, del agrónomo, del ingeniero civil o de cualquier otro especialista que esté ligado directamente con él.

Seoáñez, (1999) define al suelo de manera general como un recurso vital, la superficie emergida de la tierra o la parte de la litósfera que de alguna forma está sometida a la acción de los agentes climáticos y biológicos y por supuesto, a todos los procesos de producción del hombre como la agricultura, la industria, las infraestructuras urbanas, etc. Además, el suelo actúa como amortiguador natural controlando el transporte de elementos y sustancias químicas a la atmósfera, la hidrósfera y la biota. Por lo tanto, el mantenimiento de las funciones ecológicas del suelo es responsabilidad de la humanidad (Kabata-Pendias, A. y Pendias, H. 1992)

La definición del suelo ha tenido diferentes matices, según quien trate de hacerla y la época en que la haga.

- El geólogo define al suelo como el material resultante de la descomposición y desintegración de la roca por el ataque de agentes atmosféricos (Chiossi, 1975 citado por Crespo, 2004).
- El agrónomo, según Tschebotarioff (1979) citado por Crespo (2004), define al suelo como la delgada parte superior del manto de rocas en que penetran las raíces de las plantas y de donde éstas toman el agua y las demás sustancias para su existencia.
- Algunos ingenieros civiles (Rico y Del Castillo, 2001 citado por Crespo, 2004) definen al suelo como el conjunto de partículas minerales, producto de la

desintegración mecánica o la descomposición química de rocas preexistentes.

- Desde el punto de vista del agricultor el suelo es el sitio para ubicar sus semillas y producir sus cosechas (Worthen, 1949).

Todas estas definiciones tienen algo en común, pero para esta investigación interesa más la definición que da el edafólogo, el cual, considerando el suelo como medio de cultivo, lo define como una mezcla de materiales minerales y orgánicos capaz de soportar la vida vegetal, (Thompson y Troeh, 1998).

1.2.1. Contaminación del suelo

La contaminación es uno de los problemas más importantes del suelo, se asocia con la entrada de sustancias que, a partir de una cierta concentración deben considerarse como no deseables. El suelo puede contener una gran variedad de elementos químicos, por lo que puede resultar difícil establecer a partir de qué momento un mismo elemento deja de ser beneficioso o indiferente, para pasar a tener la calificación de contaminante.

Los efectos desfavorables de los contaminantes en el suelo como sistema son (Porta, *et al.*, 1994):

- Destrucción del poder de autodepuración por procesos de regeneración biológica normales.
- Disminución cualitativa y cuantitativa del crecimiento de los microorganismos del suelo o la alteración de su diversidad, lo que fragilita al sistema.
- Disminución del rendimiento de cultivos con posibles cambios en la composición de los productos, con riesgo para la salud de los consumidores al entrar en la cadena trófica.
- Contaminación de las aguas superficiales y freáticas por procesos de transferencia. Se alcanzan concentraciones superiores a las consideradas aceptables.

- Disminución de las funciones de soporte de actividades de ocio. Los espacios contaminados presentan problemas de salubridad para los usuarios.

1.2.2. Propiedades del suelo

Durante la evolución de los suelos ocurren una serie de procesos, donde factores como el clima, los organismos que actúan sobre el material parental, el relieve y el tiempo determinan la dinámica pedogenética, originando un suelo con propiedades físicas, químicas y biológicas particulares, es decir inherentes a él.

Para esta investigación nos enfocaremos en las propiedades físicas y químicas como parámetros de la calidad del suelo.

1.2.2.1. Propiedades físicas del suelo

Las propiedades físicas del suelo son una parte necesaria en la evaluación de la calidad de este recurso porque no se pueden mejorar fácilmente. Las propiedades que se pueden utilizar como indicadores de la calidad del suelo son aquellas que reflejan la manera en que este recurso acepta, retiene y transmite agua a las plantas, así como las limitaciones que se pueden encontrar en el crecimiento de las raíces, la infiltración o el movimiento del agua dentro del perfil y que además estén relacionadas con el arreglo de las partículas y los poros (Bautista, *et al.*, 2004).

1.2.2.1.1. Densidad aparente

La densidad aparente de un suelo indica su firmeza, es una característica que nos da a conocer las condiciones en las cuales se encuentra el suelo con respecto a la compactación, porosidad, disponibilidad de agua y de oxígeno, etc, (Ramírez, 1997). Smith, *et al.*, (1994) señalan que la densidad aparente del suelo es la masa por unidad de volumen de suelo seco en su estado no disturbado.

Puede variar desde $0.1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ o menos en suelos orgánicos, hasta $1.6 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ en suelos minerales. Puede llegar hasta valores de $1.8 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ en suelos arenosos y $2.0 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ en suelos compactados.

Como la densidad aparente incluye el espacio poroso, a mayores valores de densidad aparente disminuye proporcionalmente la porosidad del suelo.

Núñez, (2001) señala que los valores de densidad aparente que presentan los suelos son influenciados por el contenido de materia orgánica, el material parental del que se origina el suelo y el nivel de compactación por el paso continuo de maquinaria pesada o de animales de campo.

1.2.2.1.2. Densidad real

Se define como densidad real o densidad de las partículas a la relación existente entre el peso del suelo seco por unidad de volumen sin incluir el espacio poroso. La densidad real o específica relativa, normalmente tiene valores que oscilan entre $1.65 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ en suelos de alto contenido de material orgánico, hasta $2.90 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ si hay en el suelo minerales pesados como zircón o turmalina. Se acepta como promedio general o normal en los suelos una densidad real de $2.65 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Esta densidad no se altera por diferencias de partículas o por cambios en el espacio poroso y es un reflejo de la densidad de los minerales más abundantes en los suelos.

1.2.2.1.3. Porosidad

La relación entre la densidad aparente y la densidad real de un suelo permite calcular el porcentaje de espacio poroso n . El espacio poroso total del suelo es la fracción que es ocupada por el aire y el agua, definida principalmente por el arreglo de las partículas minerales, (Casanova, 2005).

La porosidad es inversamente proporcional a la compactación de los suelos, a menor porosidad los suelos son más compactos. Si estas partículas están

arregladas en agregados, como ocurre frecuentemente en suelos con elevado contenido de materia orgánica, el espacio poroso será alto.

Este valor n no permite interpretar por si solo la relación de infiltración o permeabilidad del suelo, a menos que se asocien los datos con la clase textural correspondiente. Tampoco permite describir las relaciones entre agua y aire del suelo a menos que se conozca el régimen de precipitación del área, se analice la influencia del relieve y se realice un balance hídrico, (Núñez, 2000).

Según la clase textural, se puede asumir que tipo de poros predominan en el suelo: macro o microporos. Los macroporos (mayor a 15 micras) son responsables de la aireación de los suelos y los microporos o poros capilares (menor a 15 micras), están usualmente llenos con agua. Así, en suelos arenosos dominarán los macroporos y el movimiento del agua y del aire es relativamente rápido, mientras que en suelos arcillosos habrá predominio de poros capilares y la aireación puede ser inadecuada para el desarrollo de raíces y la actividad de microorganismos, (Casanova, 2005).

1.2.2.1.4. Contenido de humedad

Desde un punto de vista hidrológico, el suelo es un depósito de agua cuya capacidad de retenerla depende de sus propiedades físicas, principalmente de la textura. Maderey, (2005) indica que un suelo está saturado cuando todos sus poros o espacios están llenos de agua, por lo tanto, se puede decir que el suelo se encuentra sin aire.

La fuerza que interviene en un suelo saturado es la gravedad en esta situación el agua se mueve libremente entre los espacios y desciende a zonas más profundas. Dicha agua se denomina libre o de gravedad. Este estado desaparece por percolación del agua en un tiempo que varía según la textura del suelo, que puede ir de horas en suelos arenosos hasta días en arcillosos. Sin embargo, una parte del agua, denominada agua capilar, queda retenida en el suelo por fuerzas superiores

a la gravedad, la cual llena los espacios capilares y se mantiene por la fuerza producida por el contacto aire-agua.

Cuando el contenido de humedad es inferior a la capacidad de retención, el movimiento del agua se rige por difusión capilar hasta llegar al contenido de humedad que señala el punto de marchitez y, pasando este, el desplazamiento del agua está regido por la evaporación. En este caso domina el potencial de fuerzas capilares sobre las restantes. La velocidad de circulación dependerá de los límites de humedad del suelo. Si la humedad es uniforme en todos los puntos del suelo, no hay movimiento.

1.2.2.1.5. Textura

La granulometría expresa las proporciones relativas a las distintas partículas del suelo inferiores a 2 mm expresadas en porcentaje, agrupadas por clases de tamaños en fracciones granulométricas, tras la destrucción de los agregados presentes en el suelo. Estas partículas son: la arena (2 – 0.02 mm), el limo (0.02 – 0.002 mm) y la arcilla (0.002 mm), (Ramírez, 1997)

El interés de conocer la granulometría reside en que permite inferir otras propiedades y características directamente relacionadas con el uso y comportamiento del suelo:

- Facilidad para la circulación del agua.
- Facilidad de preparación o laboreo del suelo.
- Drenaje.
- Riesgo de erosión hídrica.
- Riesgo de erosión eólica.
- Capacidad para almacenar nutrientes.
- Capacidad para admitir aguas residuales, purines y otros residuos líquidos.

1.2.2.1.6. Color

El color es una de las características que guarda relación directa con factores importantes como: temperatura, dinámica de los elementos y la movilidad del agua en el suelo, contenido de materia orgánica, presencia de organismos, evolución de los suelos, etc, (Ramírez, 1997).

Por una parte, el proceso de coloración del suelo no es siempre fundamenta, sin embargo, dicha coloración puede resultar de causas diferentes por lo que debe ser utilizado con circunspección y sabiendo que raramente tiene valor como criterio de clasificación al nivel de los grandes tipos de suelo, (Rucks, 2004).

Las principales sustancias que confieren el color al suelo son: humus, compuestos minerales como óxidos, sulfuros, sulfatos y carbonatos. Los colores claros son característicos de suelos abundantes en minerales blancos o incoloros como la sílice, yeso, cloruros o arcilla desprovista de impurezas. Los colores negros o pardo muy oscuro son provocados por el humus, el manganeso o sulfuros de hierro; toda la gama de coloraciones que van desde el rojo, al beige, pasando por amarillo, anaranjado y pardo; y por otra parte del gris al verde son casi siempre debidas a compuestos del hierro solos o asociados a otros elementos, (Rucks, 2004).

1.2.2.2. Propiedades químicas del suelo

Las propiedades químicas del suelo propuestas como indicadores de calidad se refieren a las condiciones de este tipo que afectan las relaciones suelo-planta, la calidad del agua, la capacidad amortiguadora del suelo, la disponibilidad de agua y nutrientes para las plantas y microorganismos. (Bautista, *et al.*, 2004).

1.2.2.2.1. pH (potencial hidrógeno)

El pH del suelo es uno de los parámetros más solicitados en los análisis de suelo, debido a que afecta la mayoría de los procesos biológicos incluyendo, además de la disponibilidad de nutrientes para las plantas, la concentración de iones tóxicos, la

capacidad de intercambio catiónico y diversas propiedades importantes, (Ramírez, 1997).

El pH es la cantidad de iones de hidrógeno (H^+) contenidos en la solución del suelo, lo cual determina la acidez o alcalinidad. Cuando la concentración de iones H^+ es alta en la solución del suelo se dice que es ácida, por el contrario, cuando es baja se dice que es básica o alcalina.

Un suelo es neutro ($pH = 7$) cuando las partículas de H^+ han sido intercambiadas equilibradamente por otros cationes, como el Ca^{2+} , el Mg^{2+} , etc. Un suelo es ácido ($pH < 7$) cuando su solución tiene una mayor cantidad de H^+ y es básico ($pH > 7$) cuando hay exceso de otros cationes.

1.2.2.2.2. Materia orgánica

La materia orgánica está formada de materiales frescos, plantas parciales y completamente descompuestas, microorganismos y humus. El humus se encuentra constituido por sustancias resultantes de la alteración (desnaturalización, desorganización y cambios en la funcionalidad) de productos sintetizados por las plantas y microorganismos, con uniones débiles con la fracción mineral. De esta manera existe material orgánico heredado, es decir, macromoléculas que son sustancias no húmicas y con características reconocibles; y material orgánico humificado que se refieren a materiales transformados que han perdido las características químicas de sus precursores, (Porta, López Acevedo y Roquero, 2003).

La materia orgánica proporciona nutrientes tales como nitrógeno, fósforo y azufre. Existen factores que influyen en el contenido de materia orgánica tales como: la vegetación, el clima, los organismos del suelo, la posición en una ladera, el drenaje, la textura, la composición mineralógica de las arcillas, la estructura y el laboreo; además de las actividades antropogénicas que puedan aportar materia orgánica al suelo como aguas residuales y otros desechos.

En las aguas residuales urbanas (ARU), la materia orgánica constituye una tercera parte de los elementos de las aguas residuales, siendo los principales elementos que se pueden hallar proteínas, carbohidratos, grasas y aceites. La principal fuente de nitrógeno de las ARU son la urea y el amoniaco, junto con las proteínas; además, también puede aportar azufre, hierro y fósforo (Espigares, 1985).

1.2.2.2.3. Nitrógeno

En condiciones naturales el nitrógeno del suelo proviene de la desintegración de la roca madre y del existente en el aire a través de los distintos procesos de fijación. Este elemento generalmente se clasifica como orgánico e inorgánico, siendo la primera forma la predominante en el suelo. La disponibilidad de este elemento en los suelos depende de la mineralización de la materia orgánica por parte de los microorganismos, la cual se da en valores cercanos a pH 7, que es donde mayor desarrollo presentan las bacterias encargadas de la nitrificación y la fijación del nitrógeno, (Ramírez, 1997).

Es fácilmente soluble en el agua del suelo y es solo parcialmente retenido por las partículas de este, es esencial para el crecimiento de microorganismos y vegetación, la limitación de esta macromolécula puede producir cambios en la composición bioquímica de los organismos y reducir sus tasas de crecimiento. Además, en cuerpos de agua, el nitrógeno en altas concentraciones es un contribuyente especial para el agotamiento del oxígeno y la eutrofización de las aguas receptoras. Estas altas concentraciones pueden deberse a la fertilización, mediante fertilizantes artificiales y abonos animales, (Espigares, 1985).

De acuerdo Espigares, (1985), el nitrógeno está presente en las ARU en forma de urea y proteínas que gracias a las bacterias se transforman en amonio y posteriormente en nitritos y nitratos. Al ser el amoniaco el primer producto de la degradación de la urea y el material proteico se puede considerar como el mejor indicador químico indirecto de contaminación fecal.

1.2.2.2.4. Fósforo

El fósforo, a diferencia del nitrógeno no tiene ayuda microbiana para incorporarse al suelo, este elemento procede sólo de la descomposición de la roca madre durante el proceso de meteorización y representa alrededor del 0.1% de la corteza terrestre.

En el suelo se puede clasificar como fósforo inorgánico y orgánico. El inorgánico es casi siempre el predominante, excepto en suelos donde la materia orgánica se haya en gran proporción; el orgánico suele ser mayor en capas superficiales que en el subsuelo debido a la acumulación de materia orgánica en las mismas. Además, es generalmente más alto en suelos jóvenes y en las áreas donde las lluvias no son excesivas, (Navarro y Navarro, 2013).

El pH del suelo representa un papel importante ya que condiciona que tipo de reacciones pueden llevarse a cabo. En pH ácido, la solubilidad del aluminio y del hierro es alta, estos compuestos precipitan con el fósforo como compuestos insolubles. En pH alcalino, el calcio aumenta su solubilidad y reacción con los fosfatos precipitándolos y formando compuestos insolubles. Por lo tanto, el fósforo presenta su mayor disponibilidad con pH entre 6.5 y 7.5, donde se presenta la mayor mineralización de fósforo orgánico e inorgánico, (Ramírez, 1997).

En aguas residuales el fósforo se puede encontrar como ortofosfato, polifosfato y fosfato orgánico. El fosfato satisface los requerimientos de fósforo de todos los organismos y se necesita en niveles mucho más bajos que el nitrógeno y al igual que este, es responsable de los procesos de eutrofización. Es por ello que es importante controlar la cantidad de fósforo que forma parte de las ARU, especialmente como componente de los detergentes (tripolifosfato de sodio), (Espigares, 1985).

1.2.2.2.5. Capacidad de intercambio catiónico y cationes intercambiables

La capacidad de intercambio catiónico se define como la capacidad que tienen las arcillas de absorber cationes que se encuentran en la solución del suelo. Estos

cationes adheridos electrostáticamente en la superficie de la arcilla pueden ser reemplazados por otro catión del suelo, los cuales son llamados cationes intercambiables, (Núñez, 2000).

Los cationes intercambiables proceden de la meteorización del material original, de la mineralización de la materia orgánica y de aportes externos superficiales y subterráneos. Se hallan en una proporción considerablemente mayor que los cationes en solución.

La propiedad del suelo de poder intercambiar iones y en concreto el tipo y clase de intercambio, tiene grandes repercusiones en el comportamiento del suelo, (Porta *et al.*, 2003):

- Controla la disponibilidad de nutrientes.
- Interviene en los procesos de floculación-dispersión de las arcillas y por consiguiente en el desarrollo de la estructura y estabilidad de los agregados.
- Determina el papel del suelo como depurador natural al permitir la retención de elementos contaminantes incorporados al suelo.

En términos químicos Casanova, (2005) refiere a la CIC como la cantidad de cationes retenidos en forma intercambiable a un determinado pH expresado en miliequivalentes por 100 g de suelo ($\text{meq}\cdot 100\text{g}^{-1}$) o centimol por kg ($\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$). Un miliequivalente es la cantidad de un elemento o compuesto que es capaz de combinarse y desplazar un miligramo (0.001 g) de hidrógeno.

El predominio de ciertos cationes en los sitios de intercambios depende fundamentalmente de si el suelo tiene pH superiores o inferiores a 6.5. En condiciones de alcalinidad ($\text{pH}>6.5$) los cationes que dominan son Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} y Na^{+} . Estos cationes son denominados cationes básicos, debido a que bajo estas condiciones hay suficientes OH^{-} para hacer el sistema alcalino y el número de cargas positivas de estos cationes básicos supera el número de cargas negativas en la superficie de los coloides, por lo tanto, aumenta la posibilidad de que estos elementos sean lavados del perfil debido a que en pH alcalino aumentan su

solubilidad. En condiciones de acidez ($\text{pH} < 6.5$) los cationes predominantes son H^+ y Al^{3+} y por esta razón se denominan cationes ácidos, (Núñez, 2000).

1.2.2.2.5.1. Potasio

El potasio presente en los suelos proviene de la desintegración y descomposición de las rocas que contienen minerales potásicos. Junto a este potasio mineral se incluye el procedente de la descomposición de restos animales y vegetales.

En la mayoría de los suelos, el potasio se encuentra en cantidades relativamente altas. El contenido como K_2O varía de 0.5 a 3% y depende de la textura del suelo; en la fracción arcillosa se encuentra el mayor contenido, por lo que los suelos arcillosos y limo-arcillosos son más ricos que los limo-arenosos y arenosos. Según Stanley, (2007) la variación del contenido de potasio también está influenciada por la intensidad de las pérdidas en extracción por cultivos, lixiviación y erosión.

1.2.2.2.5.2. Calcio

En la corteza terrestre, la concentración de calcio es de aproximadamente 3.64% en promedio, pero su contenido muestra una gran variabilidad. El calcio puede presentarse en contenido desde 1 hasta 25% en los suelos formados a partir de rocas calizas y otros materiales calcáreos y en los suelos recientemente encalados. En regiones húmedas el calcio es lixiviado y a medida que el suelo se acidifica, su lugar como catión de cambio puede ir ocupándose por el aluminio, (Wild, 1992).

En la mayoría de los suelos neutros o ligeramente ácidos, el calcio ocupa la mayor parte de las posiciones de cambio de las arcillas y de los coloides húmicos. En los suelos arenosos de las regiones húmedas hay muy bajos contenidos de calcio, varía entre 0.7 y 1.5% pero en los suelos muy meteorizados del trópico húmedo los contenidos oscilan entre 0.03 y 0.1% de calcio, independientemente de la textura.

Las pérdidas de calcio pueden ser por lixiviación, absorción por organismos del suelo, absorción por el complejo coloidal y coprecipitación como compuestos secundarios de calcio, (Kass, 1996).

1.2.2.2.5.3. Magnesio

Según diversas estimaciones el contenido medio de magnesio puede situarse en un 2.3%, lo que lo hace un elemento muy abundante en la corteza terrestre.

De acuerdo con Navarro y Navarro (2013), en los suelos se encuentra como constituyente de numerosos minerales, principalmente silicatos. En la descomposición de estos minerales, y también en la degradación de la materia orgánica que se incorpora al suelo como residuos diversos de animales y vegetales, el magnesio pasa en parte al estado de sales solubles y en este estado, al igual que ocurre con el calcio, puede tener distintos destinos: perderse por lixiviación, ser absorbido por los organismos del suelo, adsorbido o fijado por los coloides o precipitado como compuestos magnésicos secundarios, principalmente en regiones áridas.

Como ion intercambiable, en los suelos neutros o ligeramente ácidos el Mg^{2+} es el segundo en importancia cuantitativa, se comporta de forma análoga al Ca^{2+} en las reacciones de cambio, pero se ha comprobado que se transforma en no intercambiable cuando el pH de los suelos de carga variable se eleva mediante el encalado.

Se encuentran habitualmente respuestas positivas al aporte de Mg en tres clases del suelo: los arenosos con bajo contenido de magnesio intercambiable; algunos ácidos, pobres en Mg^{2+} intercambiable y algunos muy ricos en K^+ debido al antagonismo entre K^+ y Mg^{2+} , (Wild, 1992).

1.2.2.2.5.4. Sodio

El origen principal de todas las sales de sodio en el suelo son los minerales primarios en la capa más expuesta de la corteza terrestre los cuales son liberados gradualmente por los procesos de meteorización química que implica hidrólisis, hidratación, oxidación, carbonatación y otros procesos.

Los suelos que tienen un porcentaje de sodio intercambiable de más de 15 y bajos niveles de sales totales se llaman suelos sódicos. El exceso de sodio tiene un efecto adverso sobre las propiedades físicas por la dispersión de las partículas y causa deficiencias nutricionales en el suelo. El compuesto que predomina en estos es el carbonato y bicarbonato de sodio por lo que el pH de estos suelos puede ser de 8.2 o más y en casos extremos puede estar por encima de 10.5. En ocasiones, la materia orgánica dispersada y disuelta presentes en suelos altamente sódicos se acumula en la superficie por evaporación, ocasionando que la superficie de estos suelos se torne oscura denominándose suelo sódico negro, (Abrol, 1998).

Regiones de climas húmedo y semihúmedo presentan normalmente bajo contenido de sodio, debido a que por las lluvias puede ser fácilmente lixiviado a horizontes más profundos del suelo; sin embargo, en concentraciones altas de sodio puede desplazar al calcio y al potasio deteriorando su estructura. Por el contrario, se presenta mayor acumulación de sodio en regiones áridas.

Los suelos sódicos con el tiempo tienden a desarrollar una estructura y drenaje pobres porque los iones de sodio en las partículas de arcilla causan que las partículas del suelo se dispersen, además de ser duros y cuando están secos tienden a formar costras en su superficie, (Abrol, 1998).

1.2.2.2.6. Micronutrientes y metales pesados

Se considera metal pesado aquel elemento con una densidad igual o superior a 5 g/cm³ o cuyo número atómico es superior a 20. Dentro de los metales pesados podemos distinguir micronutrientes u oligoelementos y los metales pesados sin función biológica.

Los micronutrientes son elementos requeridos en pequeñas cantidades o cantidades traza por plantas y animales y son necesarios para que los organismos completen su ciclo vital; sin embargo, pasando cierto umbral se vuelven tóxicos (Graetz, 1992). Dentro de este grupo está el arsénico, boro, cobalto, cromo, cobre, molibdeno, manganeso, níquel, hierro, selenio y zinc.

Los metales pesados sin función biológica se consideran aquellos que cuya presencia en determinadas cantidades en los seres vivos lleva a disfunciones en el funcionamiento de sus organismos. Resultan altamente tóxicos y presentan la propiedad de acumularse en los organismos vivos; son, entre otros el cadmio, mercurio, plomo, antimonio, bismuto, estaño y telurio (Solano, 2005). En las ARU se pueden encontrar algunos de estos elementos confiriéndoles un carácter tóxico.

El contenido de metales pesados en los suelos, debería ser únicamente función de la composición del material original y de los procesos edafogénicos que dan lugar al suelo. Pero la actividad humana ha incrementado el contenido de estos metales en el suelo en cantidades considerables (García y Dorronsoro, 2005 citado por Solano, 2005) esto ocasiona que, concentraciones elevadas de metales pesados puedan afectar a las plantas mediante su absorción, lo cual se determina en gran medida por el pH del suelo, el contenido de materia orgánica y arcilla.

Una vez en el suelo, los metales pesados pueden quedar retenidos, pero también pueden moverse en la solución del suelo mediante diferentes mecanismos biológicos y químicos (Pagnanelli *et al.*, 2004 citado por Solano, 2005).

1.2.2.2.6.1. Hierro

El hierro puede considerarse como uno de los elementos principales, tanto en la corteza terrestre como en los suelos. Su potencial en la corteza terrestre es verdaderamente importante, alrededor del 5% (Navarro y Navarro, 2013). En los suelos, valores inferiores al 1% suelen encontrarse normalmente en suelos ácidos de textura gruesa o suelos turbosos. Kass, (1996) nos menciona que casi siempre tiene valores altos en suelos mal drenados o influenciados por cenizas volcánicas, con valores que oscilan entre 20 y 100 ppm.

La disponibilidad del hierro de acuerdo con Navarro y Navarro, (2013) es influenciada principalmente por el pH del suelo y el equilibrio de reducción-oxidación entre las formas férricas y ferrosas. La disponibilidad de ambas formas iónicas decrece con un incremento en el pH.

1.2.2.2.6.2. Cobre

El cobre se encuentra asociado a minerales sulfurosos simples y complejos, los cuales son fácilmente solubles a los procesos de intemperismo, especialmente en ambientes ácidos, también tiene una gran habilidad para interactuar químicamente con compuestos minerales y orgánicos del suelo. A menudo se puede encontrar grandes cantidades de cobre en la solución de los suelos, el intervalo de la concentración soluble es de 3 a 135 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. (Bautista, 1999),

1.2.2.2.6.3. Boro

En el suelo el boro se encuentra en cantidades extremadamente pequeñas, oscilando generalmente entre 2 y 100 ppm. (Navarro y Navarro, 2013). Se han identificado varias formas de boro en el suelo: el boro soluble en agua, el ligado a la materia orgánica, el boro en los minerales de arcilla y los borosilicatos, (Thompson y Troeh, 1998).

Las regiones húmedas experimentan pérdidas de boro por lavado. Tales pérdidas, junto a la extracción por las cosechas, dan lugar a que un número, progresivamente mayor de suelos de estas regiones, manifiesten necesidad de boro como fertilizante. Los suelos más ácidos, lavados, ricos en arenas gruesas y los orgánicos exhiben esta tendencia de modo particularmente evidente. El sobreencalado de un suelo ácido puede reducir la disponibilidad de boro existente e inducir una deficiencia en este elemento, (Thompson y Troeh, 1998).

1.2.2.2.6.4. Plomo

El plomo es un elemento que representa aproximadamente el 0.0002% de la corteza terrestre. Las concentraciones normales de este elemento en el suelo oscilan entre 3 y 189 $\text{mg}\cdot\text{Kg}^{-1}$ según Kabata y Pendías (1985), citados por Rodríguez (2008), siendo considerado tóxico en el suelo cuando alcanza concentraciones superiores a 100 $\text{mg}\cdot\text{Kg}^{-1}$.

Es un elemento poco móvil y que se concentra en los horizontes superficiales ligado a la materia orgánica. Está fuertemente retenido, ya sea por el humus, sobre todo si contiene grupos -SH , o por las fases sólidas arcillosas en donde se adsorbe químicamente. La gran afinidad del plomo por el humus hace que, al igual que el mercurio, se acumule en los horizontes superficiales del suelo (Doménech y Peral, 2006).

En el suelo se encuentra principalmente en forma de Pb^{2+} , también es conocido su estado de oxidación +4. El valor de pH desempeña un importante papel en la disponibilidad del plomo, cuanto menor sea el pH mayor cantidad de plomo se encontrará disponible en la solución del suelo. A pH alto es un elemento que precipita como hidróxido, sulfuro, fosfato o carbonato (Bautista, 1999; Rodríguez, 2008).

1.2.2.2.6.5. Cadmio

Representa el 1.5×10^{-5} % en peso de la corteza terrestre. Frecuentemente se presenta en pequeñas cantidades asociado al zinc, como ZnS (esfalerita). Minerales propios como la greenockita o blenda de cadmio (CdS), la otavita (CdCO_3) y la monteponita (CdO)

El cadmio es un metal considerado como no esencial para los sistemas biológicos y en muchos casos puede ser tóxico para plantas y animales. Puede encontrarse en los alimentos, agua, suelo y/o aire, aunque normalmente en concentraciones relativamente bajas. (Solano, 2005). Según Lafuente, (2001), los factores que más influyen en la presencia de Cd en los suelos son: los niveles atmosféricos de cadmio, la concentración del metal en las aguas residuales, aguas de riego y en los fertilizantes usados. Además, posee una gran capacidad para disolverse en el agua del suelo, pasando a formar parte de las capas profundas y superficiales e incorporándose a estructuras biológicas. Todos estos mecanismos están regulados por factores como el pH, el tipo de suelo, la vegetación, etc.

Casi todo el cadmio en el suelo o agua se obtiene como subproducto en el procesamiento de minerales de zinc, cobre y plomo. También, es el componente de algunas de las aleaciones de más bajo punto de fusión. Se emplea igualmente en recubrimientos de acumuladores y rectificadores; en soldadura y baterías de níquel-cadmio recargables, su óxido, hidróxido y cloruro se usa en galvanotecnia, su sulfuro como pigmento amarillo, los silicatos y boratos se emplean en los tubos de TV a color, etc, (Solano,2005).

La concentración de cadmio en la solución del suelo que se considera normal es de 0.2 a 6 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; aunque, puede existir naturalmente en altas concentraciones cuando se encuentra asociado a minerales de zinc. En suelos contaminados se han llegado a reportar concentraciones hasta de 400 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, (Bautista, 1999).

Cuando entra en el suelo el Cd se muestra bastante móvil y se distribuye uniformemente a lo largo del perfil del suelo. Se puede encontrar a distintas profundidades y en distinta forma molecular: ocupando sitios de intercambio catiónico en la fracción arcillosa y húmica, adsorbido o coprecipitado junto con óxidos e hidróxidos, precipitado como carbonato en suelos a pH superior a 7, precipitado como sulfuro en suelos reductores, adsorbido específicamente al material húmico formando quelatos estables y en la disolución del suelo en medios neutros - ácidos formando complejos de coordinación con otros aniones como el ion Cl^- .

1.2.2.2.6.6. Mercurio (Hg)

Este elemento entra al ambiente tanto por fuentes antrópicas como naturales. Las fuentes naturales incluyen acción volcánica, erosión de sedimentos que contienen mercurio y emisiones de gases de la corteza terrestre. Además, el mercurio se usa en la fabricación de joyería, pesticidas y otros procesos de manufactura, (Twardowska, 2006 citado por Hernández, 2012).

La mayor parte del mercurio presente en el agua y el suelo viene de las fuentes antropogénicas o de sus actividades como la minería, la combustión de

combustibles fósiles, el proceso de la pulpa y el papel, la incineración, tubos de escape de fundidoras de metales, etc. Además, los desechos de mercurio se encuentran en productos de plantas productoras de cloro, baterías usadas, bulbos de luz, procesos de recubrimiento con oro y pinturas.

Una vez que el mercurio es depositado en el suelo, las especies de Hg (II) están sujetas a muchas reacciones químicas y biológicas. Las condiciones del suelo normalmente son favorables para la formación de compuestos inorgánicos de mercurio como HgCl_2 y compuestos acomplejados con aniones orgánicos. En cuanto a la movilidad del mercurio, algunos complejos inorgánicos de Hg son bastante solubles (móviles), sin embargo, suelen formar complejos con la materia orgánica y arcillas en los suelos, lo que limita en gran medida la movilidad del mercurio, haciendo que estos actúen como grandes reservas de mercurio antropogénico, (Gaona, 2004).

El mercurio afecta de forma neurológica y reproductivamente a animales causando también ceguera, disminución del sentido del olfato, modifica la habilidad para la absorción de nutrientes en los intestinos, entre otras. Las plantas también pueden ser sensibles al mercurio reduciendo su crecimiento cuando se encuentra en altas concentraciones en el suelo, (Twardowska, 2006 citado por Hernández, 2012).

1.2.2.2.7. Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica (CE) del suelo es la capacidad que tiene de conducir la corriente eléctrica, la cual depende de la cantidad de iones positivos y negativos que se encuentran en la solución del suelo, por eso la CE del suelo es un indicador del contenido de sales disueltas. La CE comúnmente se mide en el laboratorio en el extracto de la pasta de saturación, presenta correlaciones con algunas propiedades como la capacidad de almacenamiento de agua, la presencia de capas litológicas contrastantes, los tipos de suelos, la capacidad de intercambio catiónico el contenido de carbono orgánico, la salinidad, las condiciones de drenaje, la topografía, los manejos previos y las texturas, (Bosch, *et al.*, 2012).

La acumulación de sales en el suelo se debe principalmente a problemas de drenaje y a la acción de riegos seguidos de evaporación y sequía. Cuando un suelo tiene un exceso de sales solubles se le denomina suelo salino, la medida de la CE del suelo y de las aguas de riego permite estimar en forma casi cuantitativa la cantidad de sales que contiene.

La CE del suelo es una medida que es afectada por: la combinación de contenido de agua en el suelo, contenido de sales disueltas, la porosidad, materia orgánica, contenido de arcillas, mineralogía y temperatura del suelo, (Bosch, *et al.*, 2012).

1.2.2.2.8. Aniones solubles

Los nitratos, cloruros, sulfatos carbonatos y bicarbonatos de iones alcalinos y alcalinotérreos, son sales que se forman con mayor facilidad en la corteza terrestre (Mantilla, *et al.*, 2005). Las sales más frecuentemente encontradas en el suelo son:

- Cloruros: El cloruro de sodio es la sal más frecuente en los suelos salinos, junto con los sulfatos sódico y magnésico y suele formar parte de las eflorescencias blancas que aparecen en la superficie del suelo durante la estación seca. Su toxicidad es alta (Padilla, 2014). En aguas residuales urbanas los cloruros se consideran como indicador indirecto de la contaminación fecal, sin embargo, en la actualidad, pueden tener otras procedencias como la infiltración de aguas marinas en los acuíferos subterráneos próximos al mar y también debido al uso de sustancias ablandadoras en los tratamientos de agua de abastecimiento. (Espigares, 1985). Las formas más comunes de cloruros encontradas en el suelo son: NaCl, CaCl₂, MgCl₂, KCl.
- Sulfatos: El sulfato sódico es frecuente en los suelos salinos, su solubilidad se ve fuertemente afectada por la temperatura, lo que hace que tienda a concentrarse en la superficie del suelo, ya que durante el periodo cálido asciende a la superficie del suelo y durante el periodo húmedo, se lava

menos que las otras sales. Es mucho menos tóxico que el sulfato magnésico el cual es muy soluble y altamente tóxico; el sulfato potásico es escaso, por lo que no suele ser responsable de salinización en condiciones naturales, (Padilla, 2014). En aguas residuales los sulfatos funcionan como fuente de azufre para todos los microorganismos. Si estos compuestos contaminan agua potable puede causar trastornos gastrointestinales, (Espigares, 1985). Las formas más comunes de sulfatos en el suelo son: $MgSO_4$, Na_2SO_4 .

- Nitratos: Los nitratos son la forma más oxidada del nitrógeno que se encuentra en las aguas residuales, si alcanzan fuentes de agua potable pueden ocasionar enfermedades como metahemoglobinemia infantil y el aumento en la incidencia de cáncer, (Espigares, 1985). El nitrato sódico es una sal muy soluble y tóxica en los suelos, aunque rara vez supera el 0.05%. Las formas más comunes de nitrato encontradas en el suelo son: $NaNO_3$, KNO_3 , (Padilla, 2014).
- Carbonatos y bicarbonatos: Además de los hidróxidos presentes en el suelo, la alcalinidad nos mide la cantidad de carbonatos y bicarbonatos. Los carbonatos y bicarbonatos en el suelo presentan una solubilidad elevada, aunque depende de la temperatura; su presencia en suelos en cantidades relativamente elevadas implica condiciones de alcalinidad debido a las formaciones de iones hidroxilo. La presencia de otras sales solubles en el suelo limita la formación de carbonatos y bicarbonatos, por lo que estas sales suelen ser abundantes cuando la salinidad total es baja, además, los bicarbonatos son menos alcalinos y menos solubles que los carbonatos, (Padilla, 2014). Las aguas residuales pueden tener un cierto grado de alcalinidad, cuyo origen es el agua de suministro y el aporte por las sustancias de uso doméstico, (Espigares, 1985). Las formas más comunes de carbonatos y bicarbonatos encontradas en el suelo son: Na_2CO_3 y $NaHCO_3$.

1.3. SISTEMAS RIBEREÑOS

Los ríos constituyen los ejes naturales por donde circulan las escorrentías procedentes de la cuenca vertiente, estas configuran el régimen de caudales líquidos y sólidos, que llegan a cada tramo de la red fluvial y determinan la forma, dinámica y la llanura de inundación de los cauces. En el cauce se dan procesos de erosión, transporte y sedimentación debidos al equilibrio entre las fuerzas hidráulicas que actúan sobre el lecho y los márgenes. Además, los ríos mantienen una interacción con el medio que atraviesan en muchas dimensiones o perfiles, lo que determina las características que se observan en el ecosistema fluvial a lo largo de su recorrido, (Martínez, 2015):

Perfil longitudinal

Los ríos son sistemas lineales cuyas características varían a lo largo de su longitud, este perfil corresponde al gradiente aguas arriba – aguas abajo, (Hernández, 2018). A través de la dimensión longitudinal se establecen los flujos de transporte de energía y materia como sedimentos y materia orgánica, además del agua, durante todo el recorrido del río desde la parte superior hasta la más baja (FAO, 1980). Este recorrido puede dividirse en tres secciones con características diferentes. El curso alto del río también llamado cabecera es la parte más cercana a su nacimiento y con mayor pendiente, predominan los procesos de erosión arrastrando hojas, piedras y partículas de suelo; el curso medio o zona de transferencia se caracteriza porque la pendiente de los terrenos disminuye considerablemente y en ocasiones recibe el agua de otros ríos con lo que el caudal aumenta, en esta zona son predominantes los procesos de transporte de partículas; en el curso bajo o también conocida como zona de deposición las aguas avanzan lentamente hasta llegar a su desembocadura y se produce fundamentalmente la sedimentación de la materia desprendida aguas arriba, (Martínez, 2015).

Perfil transversal

La dimensión transversal está relacionada con los intercambios entre el curso del agua y las zonas aluviales ribereñas al producirse episodios puntuales de

desbordamiento, donde las aguas ocupan más anchura que la del canal del río, por lo que se produce un flujo de materia y energía en sentido transversal. Así podemos diferenciar tres zonas: el cauce, la ribera y la llanura de inundación, (Hernández, 2018).

El cauce es la zona ocupada por el flujo de agua y sólidos con una flora y fauna acuática. Las riberas representan las zonas más próximas a los cauces bordando a los ríos y estableciendo su límite, además constituyen a la vez una zona de transición entre los sistemas terrestres de la ladera y los acuáticos del cauce. Se caracteriza por tener un nivel freático alto durante todo el año y una gran flexibilidad para soportar los empujes de los flujos de agua, (Cifuentes, *et al.*, 2017).

Por último, las llanuras de inundación son zonas donde la energía del caudal es disipada en los episodios de desbordamiento, se catalogan como zonas muy fértiles por el flujo de sedimentos y nutrientes desde el cauce hasta las llanuras, su valor ecológico depende de la frecuencia de la inundación y su duración, del nivel freático y de la diversidad física de la llanura (depresiones, meandros, crestas, suelos de distinto tipo, etc, (Martin-Vide, 2002).

En estos episodios de desbordamiento se produce un flujo de sedimentos, materia orgánica y organismos del cauce a la llanura de inundación, sin embargo, también se produce un efecto de lavado de nutrientes en esta llanura. Además de los nutrientes se disipa energía cinética haciendo cambios en la orografía, sedimentos y vegetación de la zona inundada, (Martínez, 2015).

Perfil vertical

Se refiere a la estratificación de los ecosistemas producidos entre el cauce los sustratos subsuperficiales y subterráneos del acuífero aluvial. Son generados por la dinámica fluvial y mantienen numerosos intercambios de energía, materia y organismos, (Hernández, 2018).

El espesor del sustrato del cauce y las riberas varía a lo largo del río, sus características dependen de la cuenca y su granulometría puede ser muy variable según el tramo; el material más fino como las arcillas puede representar

aproximadamente el 90% del material transportado y suele acumularse en las zonas más bajas del río donde hay menor velocidad y permite su deposición, el otro 10% está compuesto por material granular mayor y es el responsable de la morfología del cauce, (Martin-Vide, 2002).

1.3.1. Erosión por corrientes de agua

Vargas (2012) citado por Ramírez, *et al.*, (2018) menciona que los ríos en sus procesos naturales erosionan transportan y depositan material dentro del lecho mayor y sus orillas. Estos procesos varían de acuerdo con la dinámica del río, los periodos climáticos normales y de variabilidad climática.

En el movimiento del agua de un río intervienen dos factores o fuerzas: la gravedad que actúa en dirección aguas abajo y la fricción que se opone a dicho movimiento. Estas dos fuerzas determinan la capacidad de la corriente para erosionar, transportar y depositar sedimentos de la cuenca, orillas y fondo del cauce. Las características de los sedimentos dependen de factores como la influencia del clima, la vegetación, el relieve, la geología y los procesos antrópicos que intervengan.

El tamaño de las partículas y la distribución de tamaños o granulometría tienen una gran influencia en su movilidad, estas partículas se pueden clasificar como arcillas, limos, arenas, gravas, guijarros y cantos, (Cifuentes, *et al.*, 2017).

La erosión de las orillas también llamada inestabilidad lateral del cauce determina un progresivo retraimiento haciendo que el río sea cada vez más ancho y profundo. Los mecanismos de erosión en las orillas pueden estar ligados a la acción de la propia corriente o en otros casos asociados a una pérdida de cohesión de las orillas debida a su contenido de humedad.

En la erosión originada por la corriente se trata de procesos fluviales determinados por las características hidráulicas del flujo, que pueden actuar erosionando directamente las orillas, poniendo en movimiento y transporte el material que constituye las partes laterales del cauce o socavando la base del talud. Los

procesos de erosión por humedad en las orillas provocan la rotura y caída hacia el cauce del suelo, (Cifuentes, *et al.*, 2017).

En las riberas, el movimiento del agua provoca diferentes procesos de erosión y sedimentación que afectan la morfología del cauce y por consiguiente su estabilidad; la vegetación presente en las riberas controla la erosionabilidad de las orillas, dando cohesión al suelo por su sistema de raíces, además de favorecer la sedimentación de las partículas transportadas por la corriente, (Cifuentes, *et al.*, 2017).

CAPÍTULO II

2. METODOLOGÍA

La elaboración de esta investigación se llevó a cabo desde la recopilación de material bibliográfico relativo al tema; la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudio, muestreo y análisis; además del uso de manuales y guías requeridas para la interpretación de resultados.

2.1. ZONA DE ESTUDIO

2.1.1. Coronango

Localización

Coronango es uno de los 217 municipios del estado de Puebla, se localiza en la parte centro oeste del estado. Sus coordenadas geográficas son los paralelos 19° 06'36'' y 19° 10'42'' de latitud norte y los meridianos 98° 14'54'' y 98° 19'40'' de longitud occidental. El municipio colinda al norte con Tlaxcala, al sur con San Pedro Cholula, al este con Cuautlancingo y al oeste con San Miguel Xoxtla y Juan C. Bonilla.

Presenta una topografía mayormente plana con una altura de 2,190 msnm, presenta un ligero declive hacia el suroeste, donde cruza el río Prieto. Además, también cuenta con algunos lomeríos de no más de 30 metros sobre el nivel del valle (H. Ayuntamiento de Coronango, s.f.).

Hidrografía

El municipio se ubica en la porción meridional de la cuenca del río Atoyac, una de las cuencas más importantes del estado, que tiene nacimiento en una vertiente oriental de la Sierra Nevada. El río Prieto, nace en dicha cuenca y baña la porción oriental de norte a sur, atravesando la población de Coronango; posteriormente, ya fuera del municipio descarga sus aguas en el río Atoyac.

Cuenta con varios canales de riego que atraviesan el norte y se unen al Atoyac como el Tlalpalac. Por último, destaca la existencia de varios manantiales en la ribera del río Prieto: el Axoyocaxtla, Almoloca de Tlaltenango y Agua santa. (H. Ayuntamiento de Coronango, s.f.).

Clima

Presenta un solo clima, templado subhúmedo con lluvias en verano.

Características y uso de suelo

En Coronango se pueden identificar dos grupos de suelos:

- Regosol: Es el suelo predominante, ocupa toda la porción central y meridional. Además, presenta fase gravosa (fragmentos de roca o tepetate menores de 7.5 centímetros de diámetro en el suelo).
- Feozem: Cubren prácticamente toda la porción septentrional del municipio.

2.2. MUESTREO DE SUELOS

Para trabajo de tesis se eligieron cinco estaciones de muestreo propuestas a lo largo del río Prieto en el municipio de Coronango del Estado de Puebla abarcando aproximadamente cinco kilómetros del río. El muestreo se realizó en los meses de septiembre de 2015 y abril de 2016 considerados como la época de lluvia y la época de secas respectivamente. Las coordenadas de cada estación fueron referenciadas geográficamente usando un GPS Garmin Etrex como se observa en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Coordenadas de las estaciones de muestreo en el río Prieto		
Estación	Latitud Norte	Longitud Oeste
1	19°08'11.0"	98°18'50.6"
2	19°07'54.4"	98°18'36.5"
3	19°07'31.2"	98°18'14.6"
4	19°07'03.3"	98°18'13.0"
5	19°06'15.5"	98°18'14.2"

De acuerdo con las coordenadas obtenidas en campo se elaboró el mapa donde se ubica el municipio de Coronango, Puebla en el río Prieto, como se observa en la (Figura 1)

Municipio de Coronango, Puebla Estaciones de muestreo

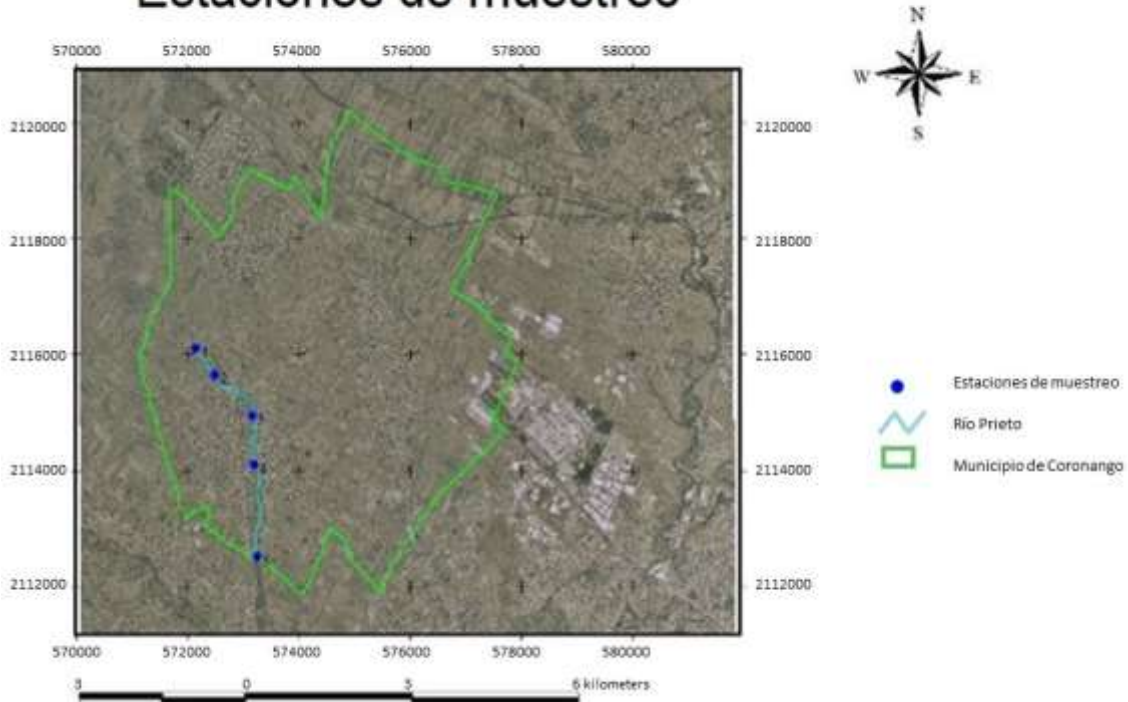


Figura 1. Ubicación de las Estaciones de muestreo en el río Prieto, municipio de Coronango, Puebla.

Fuente: elaboración propia.

El muestreo de los suelos de la ribera del río en cada época se realizó siguiendo las especificaciones de la metodología AS-01, obtención y preparación de la muestra; descrita en la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000. Hay que mencionar que, a pesar de los permisos obtenidos en el Ayuntamiento de Coronango al acceder a la zona de estudio para la obtención de muestras, los pobladores del lugar se mostraron inconformes y muy agresivos, por lo que se muestrearon los suelos de forma puntual en las cinco estaciones elegidas dejando aproximadamente un kilómetro de separación entre cada muestra. Es importante destacar que en la tercera estación de muestreo se ubicaba una descarga de aguas residuales municipales en la zona.

La recolección de las muestras de suelo de las riberas se llevó a cabo en dos épocas. Se tomaron muestras de 0 – 30 cm de profundidad, aproximadamente a un metro de la orilla del río en cada una de las cinco estaciones de muestreo, Figura 1.

Se extrajeron aproximadamente dos kilogramos por muestra y se guardaron en bolsas de plástico selladas y debidamente etiquetadas para poder ser transportadas al laboratorio y llevar a cabo su procesamiento.

2.3. PARÁMETROS DETERMINADOS

Las determinaciones físicas y químicas realizadas para evaluar la influencia que tienen las descargas de aguas residuales al río en los suelos de las cinco estaciones de muestreo en la región de Coronango, se realizaron de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana, NOM-021-SEMARNAT-2000. Dichas determinaciones se muestran en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Determinaciones físicas y químicas realizadas de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000	
Parámetros	Análisis de suelo
Preparación de la muestra	AS-01
pH medido en agua	AS-02
Densidad aparente	AS-03
Densidad real	AS-04
Contenido de humedad del suelo	AS-05
Contenido de materia orgánica	AS-07
Nitrógeno inorgánico	AS-08

Determinación de la textura del suelo	AS-09
Fósforo extraíble en suelos ácidos a neutros	AS-11
Capacidad de intercambio catiónico y cationes intercambiables en suelos neutros (Na ⁺ , K ⁺ , Mg ²⁺ , Ca ²⁺)	AS-12
Contenido de micronutrientes disponibles (hierro y cobre) y metales contaminantes (plomo, cadmio y mercurio).	AS-14
Determinación del contenido de boro	AS-15
Medición de la conductividad eléctrica	AS-18
Determinación de aniones solubles (carbonatos, bicarbonatos y cloruros) en el extracto de saturación	AS-20
Determinación del color del suelo	AS-22

2.3.1. Preparación de la muestra

El método AS-01 describe la preparación de la muestra, incluye el traslado, recepción, registro, secado, molienda, tamizado, homogeneización y almacenamiento.

Procedimiento:

- Durante el traslado al laboratorio fue necesario evitar el efecto de factores ambientales como humedad, luz, calor O₂ y CO₂ que pudieran cambiar las condiciones de la muestra.
- Una vez en el laboratorio, las muestras fueron secadas a temperatura ambiente y a la sombra, extendidas en charolas de plástico con papel absorbente a temperatura no mayor a 35 °C y una humedad relativa entre 30 y 70%.
- El suelo fue molido con un mortero y posteriormente se pasó por un tamiz número 10 de acero inoxidable. A continuación, se separó

aproximadamente 1 kg de cada muestra de suelo tamizado por el método de cuarteo, se homogeneizaron y se etiquetaron para su almacenamiento.

2.3.2. pH medido en agua

La determinación del pH fue realizada por el método AS-02. El pH controla reacciones químicas y físicas en el suelo. La determinación de pH es afectada por factores como: constituyentes orgánicos e inorgánicos que contribuyen a la acidez del suelo, la concentración de sales en la solución, la relación suelo: solución, etc.

Procedimiento:

- Se pesaron 10 g de suelo de cada muestra en balanza analítica y se colocaron en tubos de plástico.
- A cada muestra se agregaron 20 mL de agua destilada y se agitaron los tubos por 30 minutos a intervalos de 5 minutos en un agitador mecánico.
- Se calibró el potenciómetro marca CONDUCTRONIC PC 45 con soluciones búfer pH 4, 7 y 10.
- Las muestras fueron leídas con el potenciómetro calibrado.

2.3.3. Densidad aparente

La densidad aparente fue determinada con el procedimiento indicado en el manual de análisis fisicoquímico de suelos por Muñoz, *et al.*, (2015). La densidad aparente de una muestra es calculada a partir del conocimiento de la masa del suelo y el volumen total, es decir, el volumen de los sólidos y el volumen ocupado por el espacio poroso.

Procedimiento:

- Se pesó una probeta de 10 mL vacía y limpia, el peso de la probeta se registró en la bitácora.

- Se agregó la muestra de suelo a la probeta hasta llegar a la marca de los 10 mL y se golpeó ligeramente 10 veces para asentar el suelo.
- Se agregó el suelo faltante hasta llegar nuevamente a la marca de los 10 mL.
- Se volvió a golpear ligeramente (3 veces).
- La probeta con el suelo se pesó y se hicieron los cálculos correspondientes.

2.3.4. Densidad real

La densidad real del suelo se realizó por el método AS-04 de la NOM-021-SEMARNAT-2000. La densidad real puede ser calculada a partir del conocimiento de dos parámetros: la masa y el volumen de una cierta cantidad del suelo. La masa es determinada pesando directamente el suelo y el volumen de manera indirecta por el cálculo de la masa y la densidad del agua desplazado por la muestra de suelo.

Procedimiento:

- Se pesó un picnómetro en una balanza analítica utilizando pinzas para su manipulación y se registró el peso.
- Utilizando un embudo se agregaron 5 g de suelo, se pesó y se registró en la bitácora.
- Se le agregó una tercera parte de agua destilada al picnómetro cuidando de no mojarlo por fuera y se dejó reposar 30 minutos. Con movimientos suaves, se eliminaron las burbujas de aire contenidas en el suelo.
- Posteriormente, se llenó completamente el picnómetro y se puso el tapón cuidando que quedara lleno el capilar. Se secó cuidadosamente por fuera, se pesó y se registró en la bitácora.
- Una vez realizado esto, se lavó el picnómetro y se dejó en el desecador por 24 horas. Después se llenó con agua destilada y se pesó.

- Se realizaron los cálculos correspondientes para obtener las densidades reales de las muestras de suelo.

2.3.5. Contenido de humedad del suelo

El contenido de humedad del suelo se determinó por el método AS-05 de la NOM-021-SEMARNAT-2000. La determinación de la masa de agua se realizó por la diferencia en peso entre la masa del suelo húmedo y la del suelo seco. Se consideró como suelo seco aquel secado a la estufa a 105°C hasta obtener un peso constante.

Procedimiento:

- Se lavaron, limpiaron e identificaron los botes de aluminio a utilizar.
- Los botes fueron introducidos con sus tapas a la estufa durante 24 horas a 105°C hasta obtener un peso constante (sacando los botes al desecador para enfriar).
- Se pesaron 10 g de cada muestra, se colocaron en los botes de aluminio y se pesaron los botes con muestra.
- Los botes destapados se introdujeron a la estufa a 105°C por 24 horas, se enfriaron en un desecador y se pesaron.
- Se volvieron a introducir los botes a la estufa por 1 hora, se enfriaron en un desecador y se pesaron, el procedimiento se repitió hasta obtener un peso constante.
- Se realizaron los cálculos correspondientes para obtener el contenido de humedad.

2.3.6. Contenido de materia orgánica

La determinación del contenido de materia orgánica en las muestras de suelo se realizó por el método AS-07 de Walkley y Black. Este método se basa en la oxidación del carbono orgánico del suelo por medio de una disolución de dicromato de potasio y el calor de reacción generado al mezclarla con ácido sulfúrico concentrado.

Procedimiento:

- Se pesaron 0.5 g de suelo y se colocaron en un matraz Erlenmeyer de 250 mL.
- Se agregaron 5 mL de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) 1 N y lentamente se adicionaron 10 mL de ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4).
- Se agitó por un minuto y se dejó reposar por 30 minutos.
- Posteriormente se le agregaron 100 mL de agua destilada, 5 mL de ácido fosfórico (H_3PO_4).
- Para la titulación, se agregaron 5 gotas de indicador bariosulfonato de difenilamina ($C_{24}H_{20}Ba N_2O_6S_2$) y se tituló con sulfato ferroso ($FeSO_4$) 0.5 N.
- Se realizaron los cálculos correspondientes para obtener el porcentaje de materia orgánica.

2.3.7. Nitrógeno total

El contenido de nitrógeno total se realizó por el procedimiento descrito en el manual de A.O.A.C, (1980).

- Se pesaron 40 mg de suelo en la balanza analítica y se colocaron en un matraz Kjeldahl.
- Se agregó 1 g de mezcla digestora de sulfato de potasio y sulfato cúprico pentahidratado ($K_2SO_4-CuSO_4 \cdot 5H_2O$) y 2 mL de ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4).
- Se agitó hasta que se mezcló perfectamente.
- Se puso a digerir en el aparato de digestión hasta que la materia orgánica fue oxidada, lo cual se indicó por un color amarillo paja o gris claro de la solución.
- Pasada la digestión se dejó enfriar la mezcla.
- Se agregaron 2mL de agua destilada para enjuagar y 8 mL de hidróxido de sodio (NaOH) al 40%.

- Se colocó el matraz en el destilador y el amoniaco (NH_3) destilado se recibió en un matraz Erlenmeyer que contenía 6 mL de ácido bórico (H_3BO_3) al 4% y 5 gotas del indicador verde de bromocresol-rojo de metilo ($\text{C}_{21}\text{H}_{14}\text{Br}_4\text{O}_5\text{S} - \text{C}_{15}\text{H}_{15}\text{N}_3\text{O}_2$).
- Se alcanzó un volumen aproximado de 50 mL, se retiró del destilador y se tituló con ácido sulfúrico (H_2SO_4) 0.025 N.
- Se hicieron los cálculos correspondientes.

2.3.8. Determinación de la textura del suelo (AS-09)

Se utilizó el método para la determinación de la textura del suelo por el procedimiento de Bouyoucos. La textura del suelo se define como la proporción relativa de grupos dimensionales de partículas. Proporciona una idea general de las propiedades físicas del suelo.

Procedimiento:

- Se pesaron 60 g de suelo de textura fina o 120 g de suelo de textura gruesa en un vaso de precipitados. Se agregaron 80 mL de agua oxigenada al 8% y se evaporó hasta sequedad, se continuó agregando agua oxigenada hasta que no hubo efervescencia al agua oxigenada.
- Se pesaron 50 g de suelo en un vaso de batidora
- Se agregaron 15 mL de oxalato de sodio ($\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$), 15 mL de metasilicato de sodio (Na_2SiO_3) y se le adicionó agua hasta la segunda ranura del vaso.
- Se dispersó por 10 minutos en el agitador mecánico. El contenido del vaso se pasó a una probeta de 1000 mL.
- Se agregó agua destilada hasta completar un litro con el hidrómetro de Bouyoucos dentro de la suspensión y se suspendió el suelo con un agitador de mano agitando durante un minuto.
- Las lecturas del hidrómetro se tomaron a los 40 segundos y después de 2 horas de terminada la dispersión con el agitador de mano.

- Para hacer una lectura, se colocó el hidrómetro dentro de la probeta 20 segundos antes de la lectura, cuidando de alterar lo menos posible la suspensión. Después de hacer la lectura se sacó el hidrómetro, se secó y se tomó la temperatura.
- Se hicieron los cálculos correspondientes y los resultados se compararon con el triángulo de las texturas del suelo.

2.3.9. Determinación del fósforo extraíble (AS-11)

El fósforo (P) se determinó por el método de Bray y Kurtz, el cual fue diseñado para la extracción del fósforo aprovechable principalmente de suelos ácidos y neutros. La solución extractora de P remueve todas las formas de P ácido soluble como los fosfatos de calcio y una porción de fosfatos de aluminio y hierro.

Procedimiento:

- Se pesó 1 g de suelo y se colocó en un tubo de ensaye de plástico cónico.
- Se adicionaron 7 mL de solución extractora ácido clorhídrico-fluoruro de amonio (HCl – NH₄F) y se agitó por 1 minuto.
- Se filtró con papel Whatman No. 42.
- Se tomó 1 mL de filtrado de cada muestra y se leyeron en el fotómetro SPECTROQUANT NOVA 60A siguiendo el procedimiento correspondiente para la lectura.

2.3.10. Determinación de la capacidad de intercambio catiónico total, CICT

La determinación de CICT se llevó a cabo por el método de Aguilera y Domínguez, (1984).

Procedimiento:

- Se pesó 1 g de suelo y se colocó en un tubo de centrifuga.

- Se agregaron 5 mL de cloruro de calcio y se mezcló con un agitador de vidrio.
- Se agregaron otros 5 mL de coluro de calcio.
- Se centrifugó durante 5 minutos a 3000 rpm, se decantó y desechó.
- Este procedimiento fue realizado 5 veces.
- Se agregaron 5 mL de alcohol etílico, se centrifugó y desechó. Este procedimiento se realizó 5 veces.
- Se adicionaron 5 mL de cloruro de sodio, se agitó, centrifugó y se guardó para titular. Esto se realizó 5 veces.
- Se tituló con EDTA 0.01 N y se realizaron los cálculos correspondientes.

2.3.11. Determinación de cationes intercambiables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+)

Para determinar los cationes intercambiables se usará el método de Muñoz, *et al.*, (2015).

Procedimiento:

- Se pesó 1 g de suelo y se colocó en un tubo de centrífuga.
- Se agregaron 5 mL de acetato de amonio 1N a pH = 7 y se agitó con un agitador de vidrio.
- Se agregaron otros 5 mL de acetato de amonio.
- Se centrifugó durante 5 minutos a 3000 rpm, se decantó el sobrenadante en un frasco y se reservó. Se realizó 5 veces.
- El sobrenadante se vació en un matraz de 50 mL y se aforó.
- Se filtró con papel Whatman No. 42.

Para Ca^{2+} y Mg^{2+} :

Para determinar los cationes intercambiables de Ca^{2+} y Mg^{2+} , se requiere hacer una titulación donde se encuentran los dos cationes y posteriormente, con otra titulación, se encuentra solo el catión Ca^{2+} .

- Se tomaron 10 mL del filtrado y se colocaron en un matraz Erlenmeyer.

- Se agregaron 10 mL de solución buffer pH = 10 y 5 gotas de cianuro de potasio (KCN) al 2%.
- Se agregaron 5 gotas de clorhidrato de hidroxilamina y 5 gotas de negro de eriocromo T.
- Se tituló con EDTA estándar.

Para Ca²⁺:

- Se tomaron 10 mL del filtrado y se colocaron en un matraz Erlenmeyer.
- Se agregaron 5 mL de NaOH al 5% y 0.02 g de murexida como indicador.
- Se tituló con EDTA estándar y se realizaron los cálculos correspondientes.

Para Na⁺ y K⁺:

- Se prepararon los estándares de sodio y potasio, para construir la curva patrón de cada elemento.
- Se preparó la curva de calibración correspondiente (diluida en acetato de amonio) y se obtuvieron las lecturas para cada concentración.
- Se ocupó el filtrado restante y se leyeron las muestras en el flamómetro, Cole-Parmer modelo 2655-00.
- Las lecturas obtenidas se interpolaron para obtener la concentración en partes por millón.

2.3.12. Determinación de micronutrientes y metales contaminantes (AS-14)

Se llevó a cabo por el método de espectrofotometría de absorción atómica de flama con mezcla de aire-acetileno utilizando el programa Winlab32AA flama en un equipo Perkin Elmer AAnalyst 4000 a través del método AS-14.

Procedimiento:

- Se pesaron 10 g de cada muestra y fueron colocados en un matraz Erlenmeyer de 125 mL.
- Se agregaron 20 mL de ácido Dietilentriaminopentaacético (DTPA)
- Se taparon los matraces con papel parafilm y se agitaron por dos horas.

- Cada muestra se filtró con papel Whatman No. 42.
- Se realizaron las curvas de calibración con los estándares certificados de los siguientes metales pesados: Cu, Cd, Fe, Hg y Pb.

Las determinaciones de las concentraciones de metales pesados se obtuvieron en ppm.

Nota: Se realiza un blanco por cada metal pesado determinado.

2.3.13. Determinación del contenido de boro (AS-15)

La extracción de boro del suelo se realizó con una solución de cloruro de calcio 1.0 M. Ya que debido a la acción floculante del calcio sobre los componentes del suelo no se presenta turbidez en los extractos.

Procedimiento:

- Se pesaron 15 g de suelo, se colocaron en un matraz Erlenmeyer de 250 mL y se agregaron 30 mL de solución extractora de cloruro de calcio 1M.
- Se colocó cada matraz en una parrilla eléctrica y se dejó hervir por 5 minutos, posteriormente se filtraron con papel Whatman No. 42 hasta obtener un extracto claro.
- Se tomaron 2 mL del extracto y se colocaron en un tubo de ensaye.
- Se agregaron 4 mL de solución amortiguadora de acetato de amonio, EDTA, ácido acético glacial y 2 mL de solución de azometina-H.
- Se agitó y reposó una hora.
- La curva de calibración se preparó con soluciones de 2, 4, 6, 8 y 10 mg·L⁻¹ tomando 10, 20, 30, 40 y 50 mL de la solución estándar de ácido bórico en matraces aforados de 100 mL. Y se siguió la misma preparación que para las muestras.
- Se leyeron las soluciones para la curva de calibración y las muestras en un espectrofotómetro PERKIN ELMER SPECTROMETER LAMBDA 20 UV-Visible a 420 nm.

- Con resultados obtenidos se realizó la curva de calibración y las lecturas de las muestras se interpolaron para obtener la concentración de boro.

2.3.14. Medición de la conductividad eléctrica (AS-19)

Método para la determinación de la conductividad eléctrica del extracto de saturación de un suelo por medición electrolítica y una celda de conductividad como sensor.

Procedimiento:

- Se lavó y llenó la celda de conductividad con solución de KCl 0.01N.
- El medidor de conductividad se ajustó para leer la conductividad estándar de la solución de KCl a $1.413 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$
- Se lavó y llenó la celda con el extracto de saturación del suelo y se leyó la conductividad eléctrica del extracto.
- Con base en la temperatura del extracto, se hicieron las correcciones de la lectura y se obtuvieron los resultados en $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$.

Nota: La conductividad eléctrica del extracto de saturación aumenta con la temperatura. Razón por la cual los valores de conductividad deben ser corregidos a 25°C cuando son reportados.

2.3.15. Determinación de aniones solubles en el extracto de saturación (AS-20)

Método para determinar los aniones solubles (cloruros, carbonatos y bicarbonatos) en el extracto de saturación, por titulación volumétrica.

Procedimiento:

Para Carbonatos:

- Se tomaron 5 mL del extracto de saturación en un matraz Erlenmeyer.
- Se agregaron 15 mL de agua destilada

- Se añadieron 3 gotas de fenolftaleína.
- Si la solución presentaba color rosado, se titulaba con H_2SO_4 0.05 N hasta la desaparición del color y se anotaba el volumen ocupado.

Para bicarbonatos:

- Al matraz procedente de carbonatos se le añadieron 3 gotas de anaranjado de metilo.
- Se continuó la titulación con H_2SO_4 0.05 N. Hasta un vire de naranja a rojo canela y se anotó el volumen ocupado.

Para cloruros:

- Se tomaron 5 mL del extracto de saturación en un matraz Erlenmeyer de 125 mL.
- Se agregaron 15 mL de agua destilada.
- Se adicionaron 4 gotas de indicador cromato de potasio.
- Se tituló con AgNO_3 0.025 N hasta un cambio de color amarillo a rojo ladrillo.

CAPÍTULO III

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Los resultados obtenidos se compararon con los valores de referencia de cada parámetro descrito en la NOM-021-SEMARNAT-2000, así como también en la guía para interpretar el análisis químico del agua y suelo (Vázquez, 1999) y el manual de métodos de análisis de suelos (Muñoz, *et al.*, 2015).

3.1. RESULTADOS POR PARÁMETRO DETERMINADO

3.1.1. Resultados de pH

En el Cuadro 3 se presentan los resultados obtenidos del pH (potencial de hidrógeno) en los suelos de ambos muestreos. En la Figura 2 se muestra la variación de los resultados obtenidos de esta determinación.

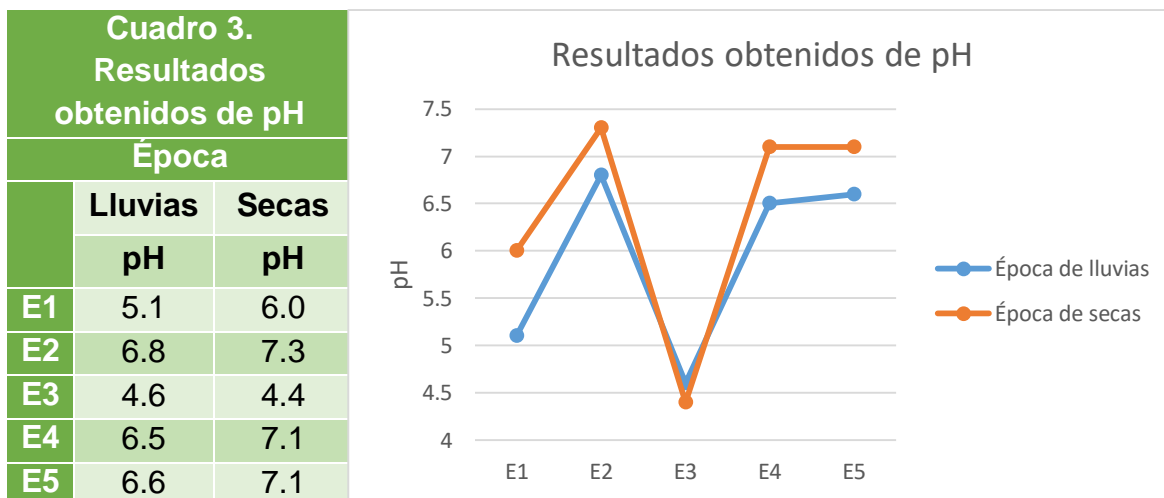


Figura 2. Comparación de los resultados de pH de las cinco estaciones de muestreo

La época de lluvias presentó valores entre 4.6 y 6.8; el menor valor se encontró en la estación 3, mientras que el mayor fue el de la estación 2. De acuerdo con los criterios que establece la NOM-021-SEMARNAT-2000 los suelos de las estaciones 1 y 4 se clasificaron como moderadamente ácidos, la estación 3 correspondió a un pH fuertemente ácido y las estaciones 2 y 5 se clasificaron como suelos neutros.

En la época de secas se obtuvo el mínimo resultado nuevamente en la estación 3 con un pH de 4.4 y el máximo en la estación 2 con un pH de 7.3; dichos suelos se clasificaron como fuertemente ácido y neutro respectivamente. Las estaciones 1 y 4 tuvieron un pH moderadamente ácido y la estación 5 se clasificó como neutro.

En la Figura 2 se aprecian los drásticos cambios en los resultados de la estación 3 con respecto a las demás estaciones en ambas épocas, pasando de suelos neutros a fuertemente ácidos en dicha estación, esto se puede deber a la diferente composición de las aguas residuales vertidas al río en la estación 3 afectando

severamente el pH del suelo. También se puede observar, que en todas las estaciones se obtuvieron pH ligeramente más ácidos en la época de lluvias pues el agua puede lixiviar iones básicos como el Ca^{2+} y el Mg^{+} los cuales son reemplazados por elementos ácidos como el Al^{3+} y el Fe^{3+} otorgándole características más ácidas al suelo, esto puede compararse con la Figura 11 donde en la época de lluvias se obtuvieron resultados de Ca^{2+} y Mg^{+} considerablemente más bajos que en la época de secas.

3.1.2. Resultados de densidad aparente

En el Cuadro 4 se presentan los resultados obtenidos de densidad aparente en los suelos de ambos muestreos y en la Figura 3 se muestra la comparación de los resultados de esta determinación

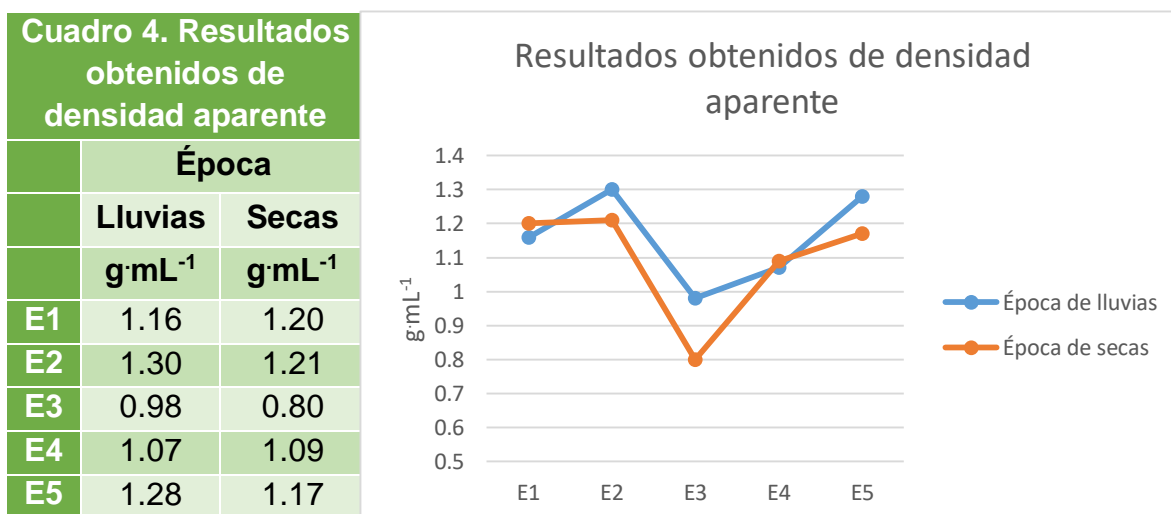


Figura 3. Comparación de los resultados de densidad real de las cinco estaciones de muestreo

En la época de lluvias se obtuvo un valor mínimo de $0.98 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ en la estación 3 y un valor máximo de $1.30 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ en la estación 2. De acuerdo con el manual de métodos de análisis de suelos (Muñoz, *et al.*, 2015) las estaciones 2 y 3 poseen una densidad aparente alta y baja respectivamente; las estaciones 1 y 4 tienen una densidad aparente media y la estación 5 se considera como alta. De acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000 las estaciones 1 y 4 presentaron un tipo de suelo

arcilloso, las estaciones 2 y 5 se consideraron suelos francosos y la estación 3 como suelo orgánico.

En la época de secas se obtuvieron resultados entre 0.8 y 1.21 g·mL⁻¹ en la estación 3 y 2 respectivamente. De acuerdo con Muñoz, *et al.*, (2015) las estaciones 1, 2, 4 y 5 poseen una densidad aparente media y la estación 3 se considera como muy baja. De acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000 las estaciones 1 y 2 son suelos francosos, la estación 3 se considera suelo orgánico y las estaciones 4 y 5 suelos arcillosos.

3.1.3. Resultados de densidad real

En el cuadro 5 se observan los resultados obtenidos de la densidad real de los suelos Y en la figura 4 se muestra la comparación de los resultados de esta determinación.

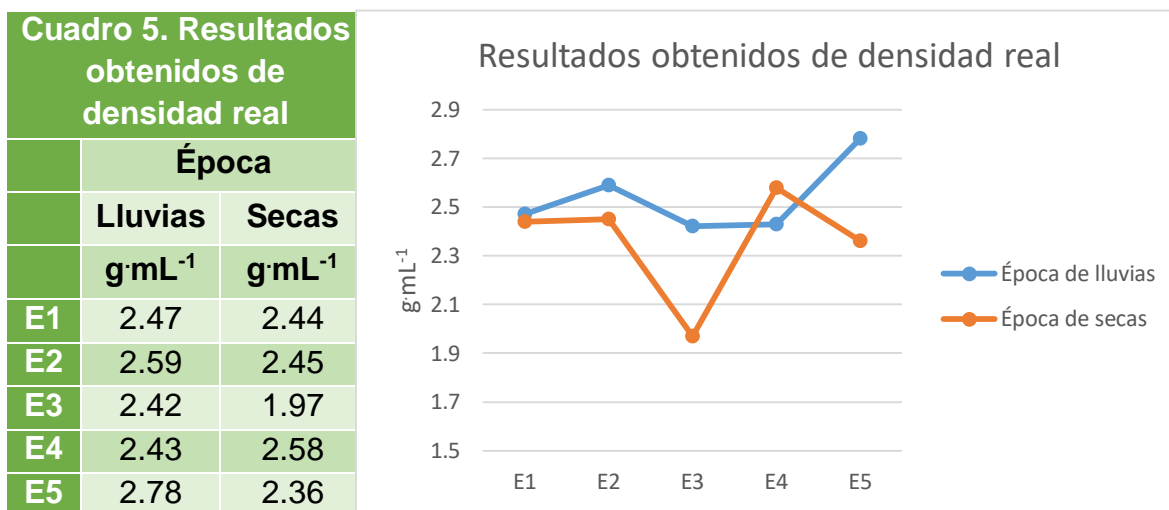


Figura 4. Comparación de los resultados de densidad real de las cinco estaciones de muestreo

En la época de lluvias los valores oscilaron entre 2.42 y 2.78 g·mL⁻¹ en las estaciones 3 y 5 respectivamente. De acuerdo con Muñoz, (2015) los suelos de las estaciones 1, 3 y 4 tienen una densidad real baja, la estación 2 se considera como media y la 5 como alta.

En la época de secas el mínimo valor nuevamente fue en la estación 3 con un valor de $1.97 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ y el máximo en la estación 4 con una densidad real de $2.58 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$. De acuerdo con Muñoz, (2015) los suelos de las estaciones 1, 2 y 5 tienen densidad real baja, en la estación 3 muy baja y la estación 4 media.

Rucks, *et al.*, (2004) nos dicen que como promedio general para la densidad real se acepta el valor de $2.65 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ en suelos normales que no poseen cantidades anormales de minerales y que valores cercanos a $1.5 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ son suelos con alto contenido de materia orgánica, lo que nos dice que en ambas épocas de muestreo las estaciones 1, 2, 4 y 5 presentaron valores bajos de materia orgánica y contenido normal de minerales presentes en el suelo; a diferencia de la estación 3 de ambos muestreos que presentó los valores más bajos del estudio indicando el mayor contenido de material orgánico presente en el suelo lo cual podemos comparar con los resultados de materia orgánica en el Cuadro 8.

1.4. Resultados de porcentaje de porosidad

Con los resultados obtenidos de densidad aparente y densidad real se obtuvo el porcentaje de porosidad de cada muestra del suelo, los cuales se observan en el Cuadro 6 y en la Figura 5 la comparación entre cada muestreo.

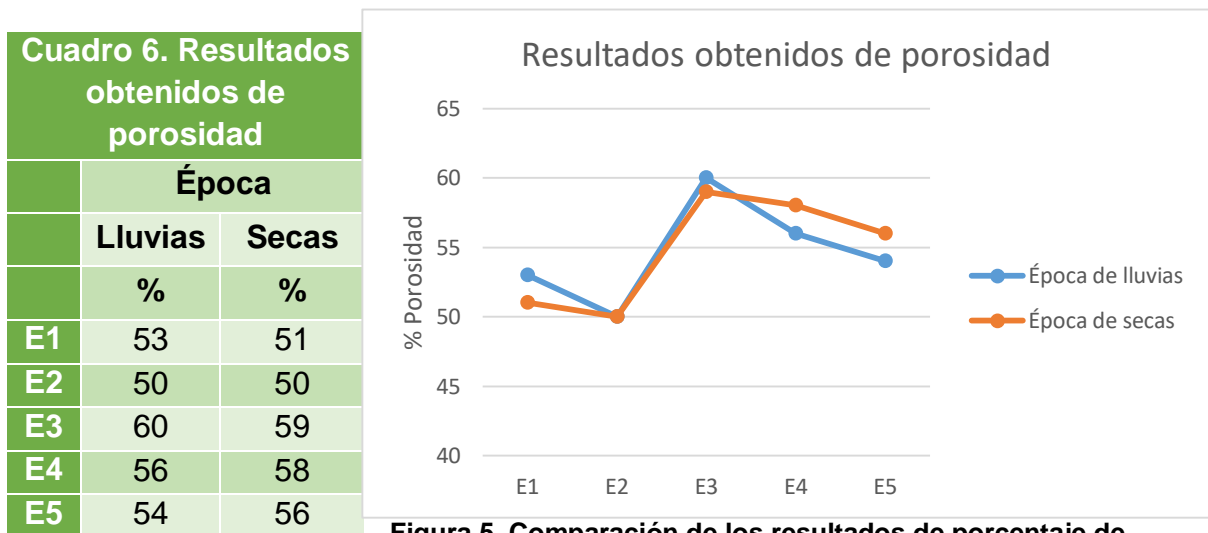


Figura 5. Comparación de los resultados de porcentaje de porosidad de las cinco estaciones de muestreo

En la época de lluvias los valores estuvieron entre 50% y 60% de poros en el suelo, de acuerdo con Muñoz, *et al.*, (2015) las estaciones 1, 2 y 5 tienen un nivel de porosidad media y las estaciones 3 y 4 alta.

En la época de secas el menor valor fue de 50% en la estación 2 y 59% en la estación 3, según Muñoz, *et al.*, (2015) las estaciones 1 y 2 tienen un nivel de porosidad media y las estaciones 3, 4 y 5 alta.

En la Figura 5 podemos observar la relación entre las estaciones y las dos diferentes épocas de muestreo, estos resultados indican una buena aireación del suelo y buena infiltración de agua. Además, es importante mencionar que Rucks, *et al.*, (2004) hizo hincapié que cuando en la textura domina la fracción arena, existe gran cantidad de macroporos a diferencia de cuando domina la fracción arcilla, lo cual podemos comparar con los resultados de textura en el Cuadro 10.

3.1.5. Resultados de contenido de humedad del suelo

Los resultados del porcentaje de humedad en los suelos se observan en el Cuadro 7 y en la Figura 6 la comparación entre los resultados.

Los menores valores de porcentaje de humedad se obtuvieron en la estación 3 en ambas épocas de muestreo y los valores máximos en la estación 1 en la época de lluvias y en la estación 5 en la época de secas.

Todos los resultados corresponden a porcentajes bajos de humedad, lo que indica un bajo contenido de agua por volumen de suelo.

Cuadro 7. Resultados de contenido de humedad		
	Época	
	Lluvias	Secas
	%	%
E1	2.28	1.79
E2	1.19	1.83
E3	0.93	0.83
E4	4.60	2.38
E5	3.88	2.98

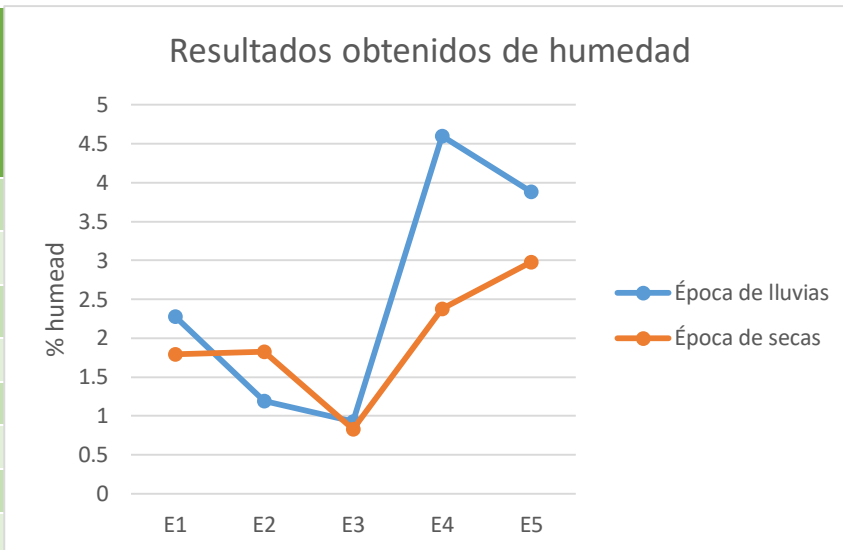


Figura 6. Comparación de los resultados de porcentaje de humedad de las cinco estaciones de muestreo.

3.1.6. Resultados de contenido de materia orgánica

Los resultados del contenido de materia orgánica en las muestras se suelo se observan en el Cuadro 8 y en la Figura 7 las comparaciones de los resultados entre ambas épocas de muestreo.

Cuadro 8. Resultados de materia orgánica		
	Época	
	Lluvias	Secas
	%	%
E1	4.46	1.25
E2	4.09	2.25
E3	5.43	10.09
E4	5.18	3.75
E5	4.33	2.75

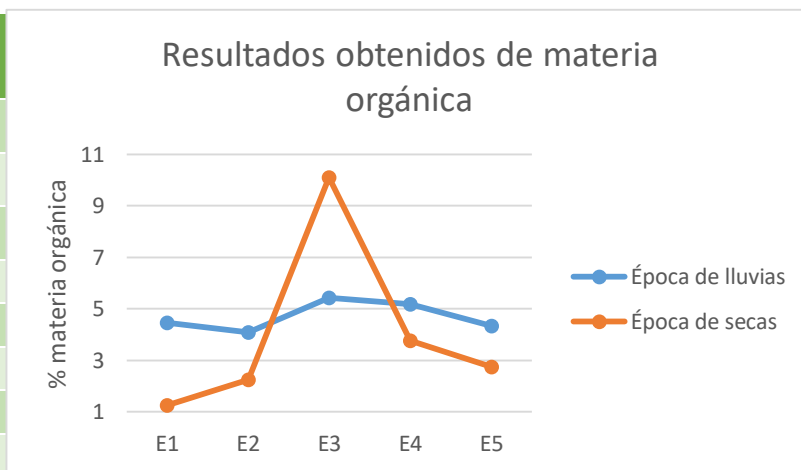


Figura 7. Comparación de los resultados de porcentaje de materia orgánica de las cinco estaciones de muestreo

En la época de lluvias los resultados oscilaron entre 4.09% y 5.43% en la estación 2 y 3 respectivamente y de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000 todas las estaciones se clasificaron con un porcentaje alto de materia orgánica.

En la época de secas el menor valor fue de 1.25% en la estación 1 y 10.09% en la estación 3. De acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000 la estación 1 tiene un porcentaje bajo, las estaciones 2 y 5 porcentaje medio, la estación 3 muy alto y la estación 4 alto porcentaje de materia orgánica.

En la Figura 7 se observa la alta variación en los resultados de la época de secas, la cual puede ser debida a la poca dispersión de los contaminantes del río por la ausencia de lluvias en esa época de muestreo. A su vez, en ambas épocas de muestreo la estación 3 fue la que presentó mayor porcentaje de materia orgánica, esto puede ser debido a las aguas residuales urbanas que son descargadas por el ducto en esta estación de muestreo.

3.1.7. Resultados de nitrógeno total

En el Cuadro 9 se presentan los resultados obtenidos en la determinación de nitrógeno total y en la Figura 8 la comparación entre los resultados de ambas épocas de muestreo.

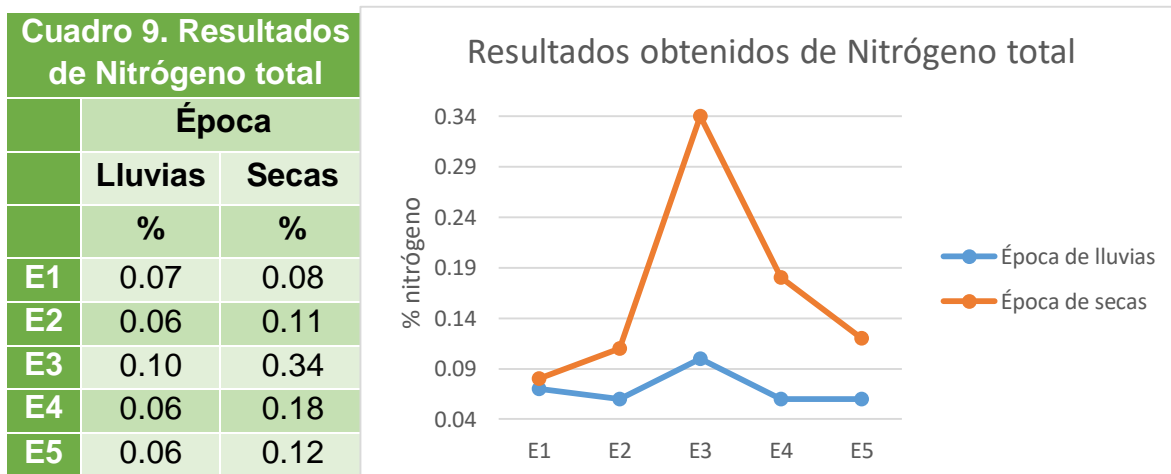


Figura 8. Comparación de los resultados de porcentaje de nitrógeno de las cinco estaciones de muestreo

En la época de lluvias los resultados presentaron poca variación obteniéndose los menores valores en las estaciones 2, 4 y 5 con un valor de 0.06% y el mayor en la estación 3 con 0.10%. De acuerdo con Muñoz, *et al.*, (2015), las estaciones 1, 2, 4 y 5 tienen un porcentaje pobre de nitrógeno y la estación 3 se considera como medio.

En la época de secas hubo mayor variación entre los resultados de las estaciones, obteniéndose el menor valor en la estación 1 con 0.08% y el mayor valor nuevamente en la estación 3 con 0.34%. De acuerdo con Muñoz, *et al.*, (2015), la estación 1 tuvo un porcentaje pobre de nitrógeno, la estación 2 se consideró como medio, las estaciones 4 y 5 presentaron un porcentaje medianamente rico y la estación 3 tuvo un porcentaje rico en nitrógeno total.

Es importante mencionar que en varios tramos cercanos a la orilla del río se pueden encontrar cultivos principalmente de maíz y de acuerdo con Espigares, (1985) las altas concentraciones de nitrógeno pueden deberse al uso fertilizantes utilizados en los suelos y que, en este caso, se desplazan hacia la ribera. Además, como se observa en la Figura 8, el aumento en el porcentaje de nitrógeno en la estación 3 en ambas estaciones, puede ser un indicador de los efectos en el suelo de las descargas de aguas residuales urbanas al río en este punto de muestreo, pues, como menciona Espigares, (1985) en las aguas residuales el nitrógeno puede estar presente por los deshechos de comida y materia fecal.

3.1.7. Resultados de textura

Con los porcentajes de limo, arena y arcilla obtenidos se determina la textura correspondiente de cada muestra de suelo usando el triángulo de texturas del departamento de agricultura de los EE. UU. (USDA). En el Cuadro 10 se muestran los resultados de cada fracción, así como la clasificación textural de las cinco estaciones de muestreo.

Cuadro 10. Resultados de Textura					
		%Arena	%Arcilla	%Limo	Clasificación textural
Época de lluvias	E1	73	11	16	Franco arenoso
	E2	73	3	24	Arenoso franco
	E3	63	14	23	Franco arenoso
	E4	87	2	11	Arenoso franco
	E5	79	9	12	Arenoso franco
Época de secas	E1	71	10	19	Franco arenoso
	E2	68	10	22	Franco arenoso
	E3	47	10	43	Franco
	E4	50	18	32	Franco
	E5	40	25	35	Franco

En ambas épocas de muestreo los suelos presentaron características de suelos francos, predominando la fracción arena. De acuerdo con Rucks, (2004) este tipo de suelos se consideran de textura media o moderadamente fina con mayor proporción de arenas, tienen características pegajosas y plásticas cuando están mojados, suaves y firmes cuando están húmedos y ligeramente duros cuando se encuentran secos. Los agregados que forman estos suelos son de tamaño pequeño a medio y presentan una proporción de poros de tamaño medio-alto, además tienen una buena capacidad para retener agua y nutrimentos.

3.1.8. Resultados de fósforo extraíble

En el Cuadro 11 se observan los resultados obtenidos de fósforo extraíble y en la Figura 9 la variación entre los resultados de ambas épocas.

Cuadro 11. Resultados de fósforo extraíble		
	Época	
	Lluvias	Secas
	mg·kg ⁻¹	mg·kg ⁻¹
E1	1.2	2.3
E2	4.4	4.9
E3	3.2	1.4
E4	7.2	8.5
E5	6.7	5.2

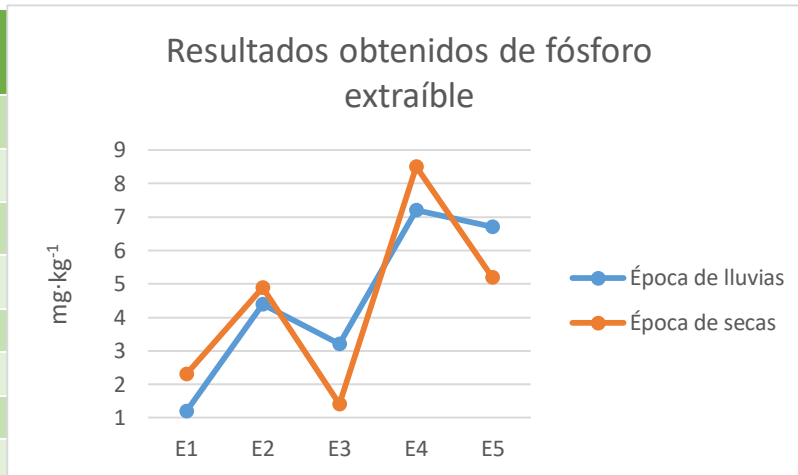


Figura 9. Comparación de los resultados de fósforo extraíble de las cinco estaciones de muestreo

En la época de lluvias los resultados fueron de 1.2 a 7.2 mg·kg⁻¹ en la estación 1 y 4 respectivamente.

En la época de secas el menor resultado se obtuvo en la estación 3 con 1.4 mg·kg⁻¹ y el mayor en la estación 4 con 8.5 mg·kg⁻¹.

Para ambas épocas de muestreo: La NOM-021-SEMARNAT-2000 clasifica a todas las estaciones con un contenido bajo de fósforo extraíble. Muñoz, *et al.*, (2015) clasifica las estaciones 1 y 3 con contenido pobre de fósforo asimilable, y las estaciones 2, 4 y 5 con contenido medio.

3.1.9. Resultados de capacidad de intercambio catiónico total (CICT)

Los resultados obtenidos en la determinación de la capacidad de intercambio catiónico total se muestran en el Cuadro 12 y en la Figura 10 la comparación de los resultados entre estaciones y épocas de muestreo.

Cuadro 12. Resultados de capacidad de intercambio catiónico total		
	Época	
	Lluvias	Secas
	Cmol(+) \cdot kg ⁻¹	Cmol(+) \cdot kg ⁻¹
E1	4.57	12.55
E2	2.42	14.23
E3	6.93	25.58
E4	4.29	15.03
E5	3.96	16.39

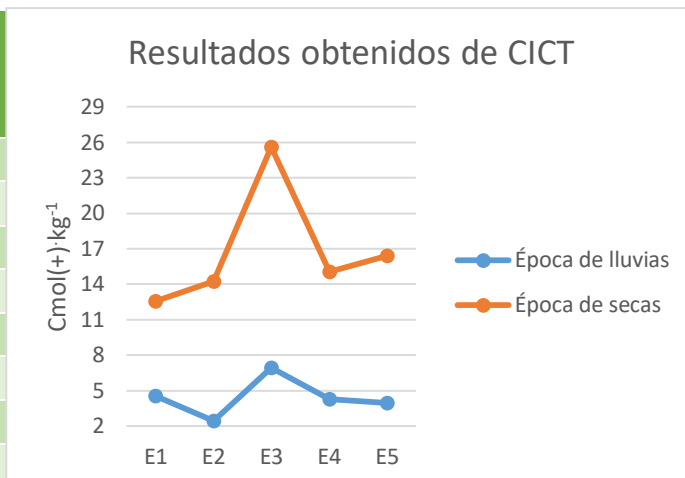


Figura 10. Comparación de los resultados de CICT de las cinco estaciones de muestreo

En la época de lluvias los resultados obtenidos de CICT oscilaron entre 2.42 y 6.93 Cmol(+) \cdot kg⁻¹ en las estaciones 2 y 3 respectivamente. De acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000 las estaciones 1, 2, 4 y 5 tuvieron una CICT muy baja y la estación 3 baja. Núñez, *et al.*, (2015) consideraron que todos los valores menores a 10 Cmol(+) \cdot kg⁻¹ corresponden a una CICT muy baja, por lo que todas las estaciones se encontraron en esta clasificación.

En la época de secas, el valor mínimo se obtuvo en la estación 1 con 12.55 Cmol(+) \cdot kg⁻¹ y el máximo en la estación 3 con 25.58 Cmol(+) \cdot kg⁻¹. La NOM-021-SEMARNAT-2000 clasifica los suelos de las estaciones 1 y 2 con una CICT baja, las estaciones 4 y 5 con una capacidad media y la estación 3 se consideró con una CICT alta. De acuerdo con Núñez, (2015) las estaciones 1, 2, 4 y 5 tuvieron una capacidad de intercambio catiónico baja y la estación 3 media.

En la Figura 10 se puede apreciar el efecto que tiene la descarga de aguas residuales en los suelos de la ribera, pues los valores de esta estación en ambas épocas de muestreo fueron notablemente más altos respecto a las demás estaciones. Sin embargo, la diferencia de resultados entre la época de lluvias y la de secas se ven influenciados por las lluvias que lavan el contenido de iones presentes en los suelos. Siebe, Jahn y Stahr, (1996) señalaron que la CIC está

relacionada a la cantidad de materia orgánica presente en el suelo, podemos comprobar esta aseveración al comparar los resultados obtenidos de CIC con los de materia orgánica en el Cuadro 8 donde se observa la relación entre el alto porcentaje de materia orgánica presente y la alta CIC, sobre todo en la tercera estación para la época de secas.

3.1.10. Resultados de cationes intercambiables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+)

En el Cuadro 13 se observan los resultados obtenidos de cationes intercambiables del suelo y en la Figura 11 se muestran las diferencias entre cada época de muestreo.

Cuadro 13. Resultados de cationes intercambiables								
	Ca^{2+}		Mg^{2+}		Na^+		K^+	
	LI*	S*	LI	S	LI	S	LI	S
$\text{Cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$								
E1	1.93	3.21	1.32	2.34	0.03	3.30	0.37	1.01
E2	2.61	6.46	0.49	1.46	0.03	10.50	0.08	0.88
E3	5.28	11.88	2.70	4.22	0.3	29.50	0.31	1.21
E4	4.84	7.59	0.99	1.90	0.04	5.50	0.08	0.41
E5	1.65	6.57	0.58	3.14	0.02	23.50	0.05	0.79

*LI: época de lluvias *S: época de secas

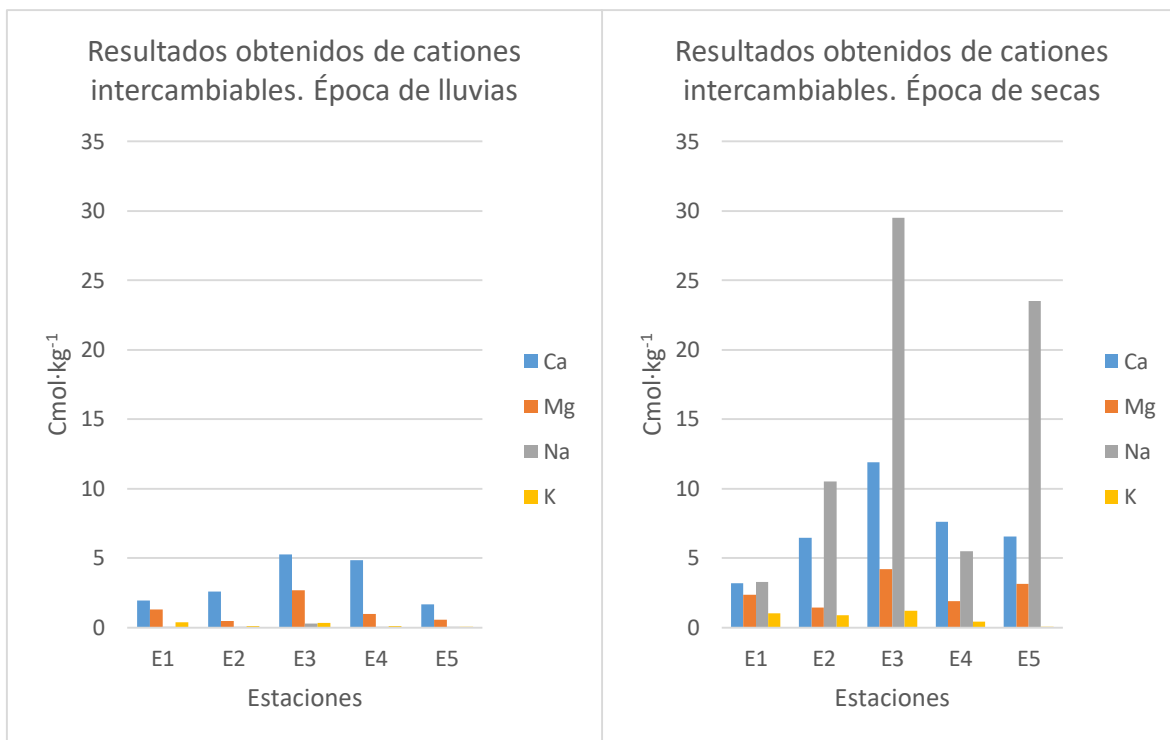


Figura 11. Comparación de los resultados de cationes intercambiables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+) de las cinco estaciones de muestreo

En la época de lluvias los resultados de calcio variaron entre 1.65 y 5.28 $\text{Cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$ en la estación 5 y 3 respectivamente. Para el magnesio intercambiable el menor valor se obtuvo en la estación 2 con un valor de 0.49 $\text{Cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$ y un máximo en la estación 3 de 2.70 $\text{Cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$. En cuanto a sodio se obtuvo un mínimo resultado en la estación 5 con 0.02 $\text{Cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$ y un máximo en la estación 3 con 0.30 $\text{Cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$. Los resultados de potasio oscilaron entre 0.05 y 0.37 $\text{Cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$ en la estación 5 y 1 respectivamente.

De acuerdo con Muñoz, *et al.*, (2015) los resultados de Ca^{2+} intercambiable en las estaciones 1, 2 y 5 se consideran como muy bajos y las estaciones 3 y 4 como bajos. En cuanto al Mg^{2+} intercambiable la estación 2 presentó una clasificación muy baja, las estaciones 1, 4 y 5 baja y la estación 3 media. En el caso del K^+ las estaciones 2, 4 y 5 tuvieron una capacidad de intercambio baja y las estaciones 1 y 3 media. En cuanto a los valores de Na^+ todas las estaciones en la época lluviosa presentaron valores menores a 0.3 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ y de acuerdo con Rioja, (2002) resultados menores a 0.3 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ se consideran suelos con muy bajo contenido

de sodio, lo que implica que no existen problemas de sodicidad ni ningún cambio en las propiedades físicas ni químicas ocasionadas por este elemento en el suelo.

En la época de secas el menor resultado obtenido para calcio fue de $3.21 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ en la estación 1 y el mayor fue de $11.88 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ en la estación 3. En cuanto al magnesio, los resultados se encontraron entre 1.46 y $4.22 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ en las estaciones 2 y 3 respectivamente. Para sodio se obtuvo un mínimo resultado en la estación 1 con $3.30 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ y un máximo en la estación 3 con $29.50 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$. Por último, los resultados de potasio intercambiable se encontraron entre $0.41 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ en la estación 4 y $1.21 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ en la estación 3.

De acuerdo con Muñoz, *et al.*, (2015) los resultados obtenidos en Ca^{2+} clasifican a la estación 1 con una baja capacidad de intercambio y las estaciones 2, 3, 4 y 5 como capacidad media. En cuanto a Mg^{+} las estaciones 2 y 4 se consideran como bajas y las estaciones 1, 3 y 5 como medias. Para K^{+} intercambiable las cinco estaciones se consideran con una alta capacidad de intercambio. Por último, el contenido de Na^{+} se incrementó de manera abrupta en la época de secas, y según Rioja, (2002) estos resultados representan un contenido muy alto de sodio, esto puede ser debido a las altas concentraciones de este elemento que contienen las aguas residuales urbanas arrojadas al río por la elaboración de los alimentos.

Además, podemos observar en la Figura 11 que los mayores valores en todas las determinaciones y en ambas épocas de muestro se encuentran en la estación de muestreo 3, lo cual puede ser causado por las aguas residuales municipales vertidas al río, concentrándose mayor cantidad de cationes en esta estación.

3.1.11. Resultados de micronutrientes y metales pesados biodisponibles

Los resultados de los 5 metales analizados se observan en el Cuadro 14 y la comparación entre los resultados y las dos épocas de muestreo se encuentran en la Figura 12.

En la época de lluvias los resultados de Cu tuvieron un valor mínimo de $0.68 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en la estación 2 y un valor máximo de $1.93 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en la estación 3 con un

promedio de 1.26 mg·kg⁻¹. Para Fe los valores obtenidos fueron de 12.02 a 18.53 mg·kg⁻¹ en las estaciones 2 y 5 respectivamente con una media de 15.14 mg·kg⁻¹. En cuanto a Cd el valor mínimo fue de 0.01 mg·kg⁻¹ obtenido en las estaciones 2, 3 y 5 un máximo de 0.02 mg·kg⁻¹ en las estaciones 1 y 4, y un promedio de 0.01 mg·kg⁻¹. Los resultados de Pb oscilaron entre 0.23 y 0.52 mg·kg⁻¹ en las estaciones 5 y 4 respectivamente con un promedio de 0.35 mg·kg⁻¹. Los valores de Hg variaron de 0.11 hasta 0.38 mg·kg⁻¹ en las estaciones 4 y 3 respectivamente con una media de 0.21 mg·kg⁻¹.

En la época de secas los valores de Cu fueron de 0.88 a 1.89 mg·kg⁻¹ en las estaciones 1 y 2 respectivamente, con un promedio de 1.44 mg·kg⁻¹. Los resultados de Fe tuvieron un valor mínimo de 16.01 mg·kg⁻¹ en la estación 5 y un valor máximo de 20.52 mg·kg⁻¹ en la estación 3 con un promedio de 17.67 mg·kg⁻¹. Para Cd se obtuvieron los menores valores en las estaciones 3 y 5 con 0.03 mg·kg⁻¹ y el valor más alto en la estación 2 con 0.08 mg·kg⁻¹ con una media de 0.05 mg·kg⁻¹. En cuanto a Pb los resultados se encontraron entre 0.19 mg·kg⁻¹ en la estación 5 y 0.61 mg·kg⁻¹ en la estación 4 con un promedio de 0.39 mg·kg⁻¹. Por último, los resultados obtenidos de Hg variaron de 0.18 hasta 0.42 mg·kg⁻¹ en las estaciones 5 y 3 respectivamente con una media de 0.31 mg·kg⁻¹.

Cuadro 14. Resultados obtenidos de metales pesados biodisponibles

	Cobre		Hierro		Cadmio		Plomo		Mercurio	
	LI*	S*	LI	S	LI	S	LI	S	LI	S
	(mg·kg ⁻¹)									
E1	1.00	0.88	15.54	17.28	0.02	0.06	0.31	0.33	0.13	0.28
E2	0.68	1.89	12.02	17.57	0.01	0.08	0.34	0.59	0.25	0.33
E3	1.93	1.06	14.20	20.52	0.01	0.03	0.35	0.24	0.38	0.42
E4	1.79	1.99	15.40	16.98	0.02	0.04	0.52	0.61	0.11	0.32
E5	0.92	1.41	18.53	16.01	0.01	0.03	0.23	0.19	0.19	0.18
P*	1.26	1.44	15.14	17.67	0.01	0.05	0.35	0.39	0.21	0.31

*LI: época de lluvias

*S: época de secas

*P: promedio

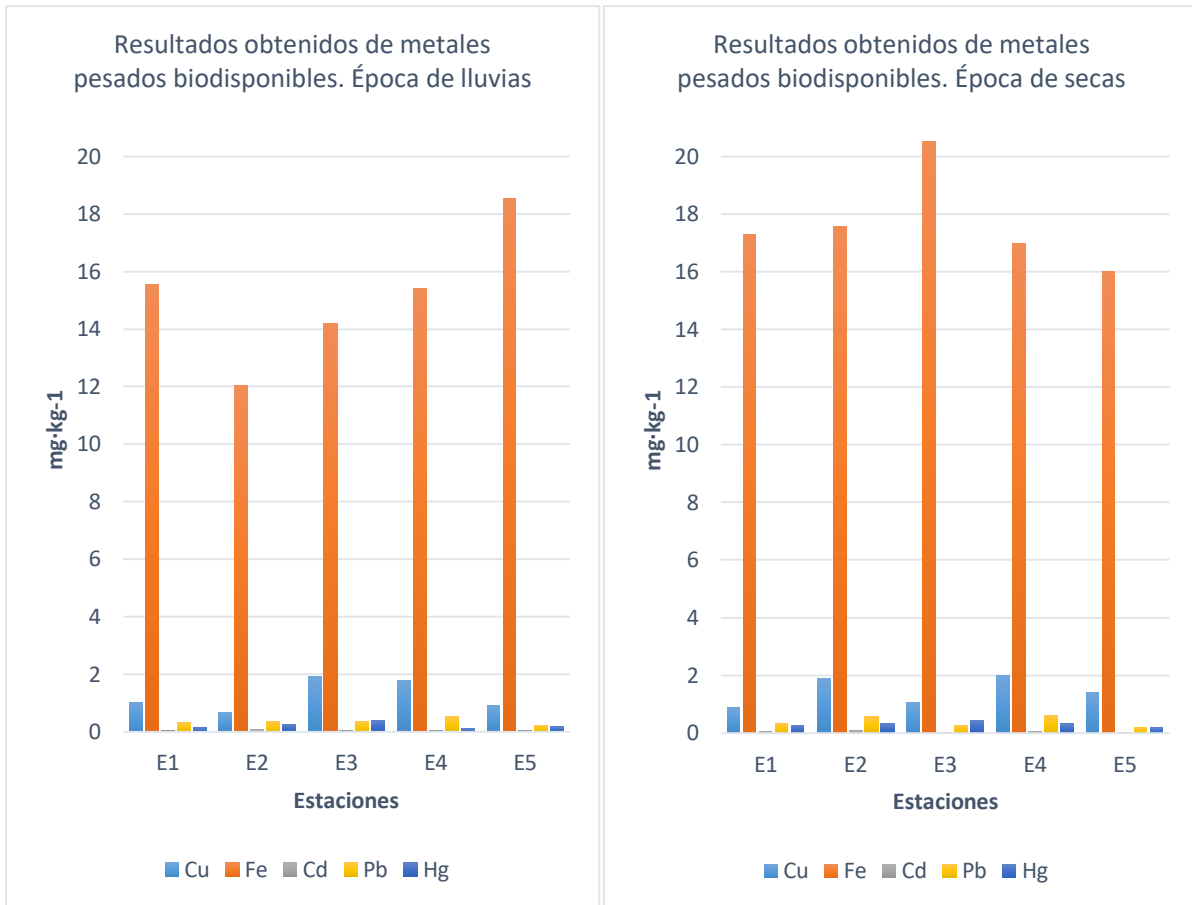


Figura 12. Comparación de los resultados de metales pesados biodisponibles de las cinco estaciones de muestreo

De acuerdo con Ankerman y Large (s.f.) citados por Vázquez (1999) los resultados se clasifican como:

Para Cu, en la época de lluvias la estación 2 tiene un contenido bajo, las estaciones 1 y 5 un contenido medio y las estaciones 3 y 4 un contenido alto de cobre. En la época de secas la estación 1 se considera como bajo, la estación 3 como medio y las estaciones 2, 4 y 5 como alto.

En cuanto al Fe, en la época de lluvias las estaciones 1, 2, 3 y 4 tienen un contenido medio y la estación 5 un contenido alto de hierro. En la época de secas solo la estación 5 tiene un contenido medio de hierro y las estaciones 1, 2, 3 y 4 un contenido alto.

Vázquez, (1999) en su cuadro Contenidos normales y permisibles de diferentes metales en suelos, menciona que para Cu se consideran como normales, niveles entre 2 y 20 mg·kg⁻¹ y como permisible hasta 100 mg·kg⁻¹. En cuanto al Cd la concentración normal se encuentra entre 0.1 y 1.0 mg·kg⁻¹ y se permite hasta 2 mg·kg⁻¹. Para Pb se consideran normales concentraciones entre 1 y 30 mg·kg⁻¹ y son permitidas concentraciones hasta 100 mg·kg⁻¹. Por último, las concentraciones normales de Hg en un suelo van de 0.1 a 1 mg·kg⁻¹ y se permite hasta 2 mg·kg⁻¹. De acuerdo con esto todos los metales analizados en ambas épocas de muestreo se encuentran dentro de las concentraciones normales y permitidas en el suelo.

En la Figura 12 se observa que no hubo mucha variación entre los resultados de los metales analizados ni efectos negativos claros del agua contaminada descargada al río en la estación 3 como en otras determinaciones. Sin embargo, hay un ligero incremento en las concentraciones de todos los metales en la época de secas posiblemente debido a la poca dispersión de los metales en ausencia de lluvias.

3.1.12. Resultados de contenido de boro

En el Cuadro 15 se muestran los resultados obtenidos en la determinación de boro y en la Figura 12 la comparación de los resultados entre ambas épocas de muestreo.

Cuadro 15. Resultados de contenido de boro		
	Época	
	Lluvias	Secas
	(mg·kg ⁻¹)	
E1	0.42	0.97
E2	0.28	0.86
E3	2.70	3.36
E4	0.89	0.99
E5	1.67	1.19

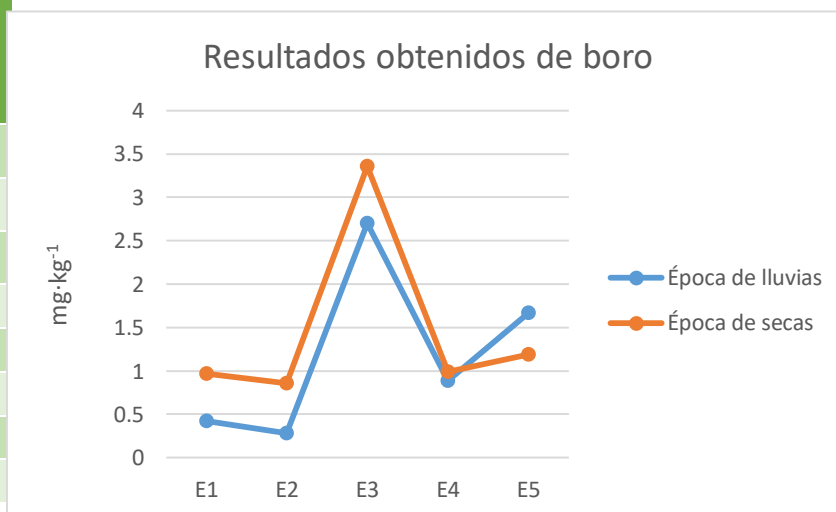


Figura 13. Comparación de los resultados de boro extraíble de las cinco estaciones de muestreo

En la época de lluvias los resultados obtenidos de boro van de $0.28 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en la estación 2 y $2.70 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. De acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000 la estación 2 se clasificó con un contenido muy bajo, la estación 1 con contenido bajo, la estación 4 tuvo un contenido medio, la estación 5 tuvo alto contenido y la estación 3 tuvo un contenido muy alto de boro. Ankerman y Large, citados por Vázquez (1999) clasifican a las estaciones 1 y 2 con un contenido muy bajo de boro, la estación 4 con contenido bajo, la estación 5 con un contenido alto y la estación 3 con un contenido muy alto de boro.

Para la época de secas el mínimo resultado se obtuvo en la estación 2 con $0.86 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ y el máximo en la estación 3 con $3.36 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. De acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000 las estaciones 1, 2, 4 y 5 tuvieron un contenido medio de boro y la estación 3 se clasificó con contenido muy alto. Ankerman y Large, clasifican a la estación 1, 2 y 4 con contenido bajo, la estación 5 con contenido medio y la estación 3 con un contenido muy alto de boro.

En la Figura 13, se puede observar que en la época de lluvias en las estaciones 1, 2, 3 y 4 hay menores niveles de boro en los suelos. De acuerdo con Infoagro, (2016) en suelos con pH menores a 7 domina la forma no disociada de ácido bórico H_3BO_3 , por esta razón, el boro puede ser lavado fácilmente en condiciones de humedad y en suelos con mayor contenido de arenas, mientras que en zonas secas y/o suelos arcillosos tiende a acumularse, en los resultados de textura en Cuadro 10 las estaciones 1 y 2 de ambas épocas tienen el mayor contenido de arena y los valores más bajos de boro asimilable. Además, se considera que la principal fuente de boro es la materia orgánica por lo que si comparamos los valores obtenidos en la estación 3 de ambas épocas con los obtenidos de materia orgánica en la Figura 7 podemos observar la relación entre los resultados.

3.1.13. Resultados de conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica fue determinada en el extracto de saturación del suelo por medición electrolítica de las sales solubles y una celda de conductividad como sensor para evaluar la concentración salina del suelo. Los resultados obtenidos se muestran en el Cuadro 16 y la comparación entre épocas en la Figura 14

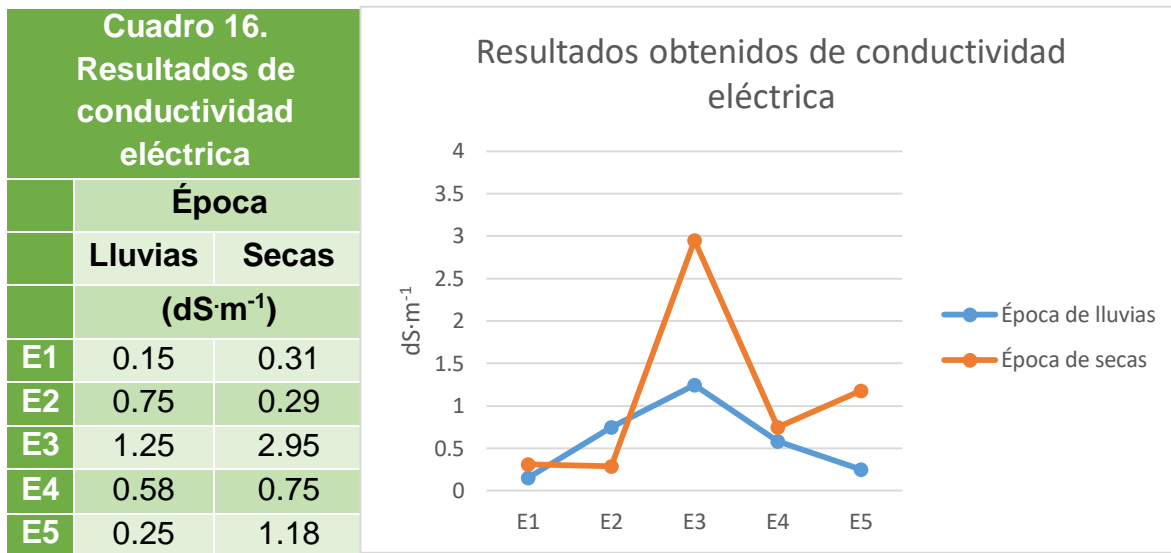


Figura 14. Comparación de los resultados de conductividad eléctrica de las cinco estaciones de muestreo

De acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000 todas las estaciones de la época de lluvias tienen efectos despreciables de salinidad ya que los valores no sobrepasan 1 dS·m⁻¹; sin embargo, como se esperaba, la estación 3 tuvo un valor más alto que las demás de 1.25 dS·m⁻¹ lo cual se considera ligeramente salino.

En la época de secas el valor más alto fue nuevamente encontrado en la estación 3 considerándose como moderadamente salino, mientras que la estación 5 se clasificó como muy ligeramente salina y las estaciones 1, 2 y 4 con efectos despreciables de salinidad.

Richards, citado por Vázquez (1999) considera que suelos menores a 2.0 dSm⁻¹ son suelos no salinos, con efectos de salinidad casi nulos, por lo que todas las estaciones en la época lluviosa se encuentran en esta clasificación. Para la época

seca únicamente la estación 3 donde se obtuvo un valor de 2.95 dSm^{-1} se considera como un suelo poco salino.

3.1.14. Resultados de aniones solubles en el extracto de saturación

Los resultados de la determinación de aniones solubles se muestran en el cuadro 17 y la comparación entre los resultados de ambas épocas de muestreo en la Figura 15.

Cuadro 17. Resultados obtenidos de aniones solubles (cloruros, carbonatos y bicarbonatos)						
	Cl⁻		HCO₃⁻		CO₃²⁻	
	mmol·L⁻¹					
	LI*	S*	LI	S	LI	S
E1	0.48	8.16	22.50	21.60	0.00	0.00
E2	0.36	6.24	24.30	12.06	0.00	0.00
E3	2.20	12.50	22.50	14.14	0.00	0.00
E4	0.29	6.72	18.00	13.50	0.00	0.00
E5	0.36	9.12	13.50	16.56	0.00	0.00
P	0.74	8.55	20.16	15.58	0.00	0.00

*LI: época de lluvias *S: época de secas *P: promedio

En la época de lluvias los resultados de Cl⁻ fueron de 0.48 a 2.20 mmol·L⁻¹ obteniéndose el menor valor en la estación 1 y el mayor en la estación 3, con un promedio de 0.74 mmol·L⁻¹. Para HCO₃⁻ el menor valor se obtuvo en la estación 4 con 13.50 mmol·L⁻¹ y el mayor fue en la estación 2 con 24.30 mmol·L⁻¹ con un promedio de 20.16 mmol·L⁻¹. En cuanto al CO₃²⁻ no se obtuvieron resultados.

En la época de secas el mínimo valor de Cl⁻ fue de 6.24 mmol·L⁻¹ obtenido en la estación 2 y el mayor fue de 12.50 mmol·L⁻¹ en la estación 3 con un promedio de 8.55 mmol·L⁻¹. Para HCO₃⁻ los valores estuvieron entre 13.50 y 21.60 mmol·L⁻¹ en las estaciones 4 y 1 respectivamente, con un promedio de 15.58 mmol·L⁻¹. Por último, no se obtuvieron resultados en la determinación de CO₃²⁻.

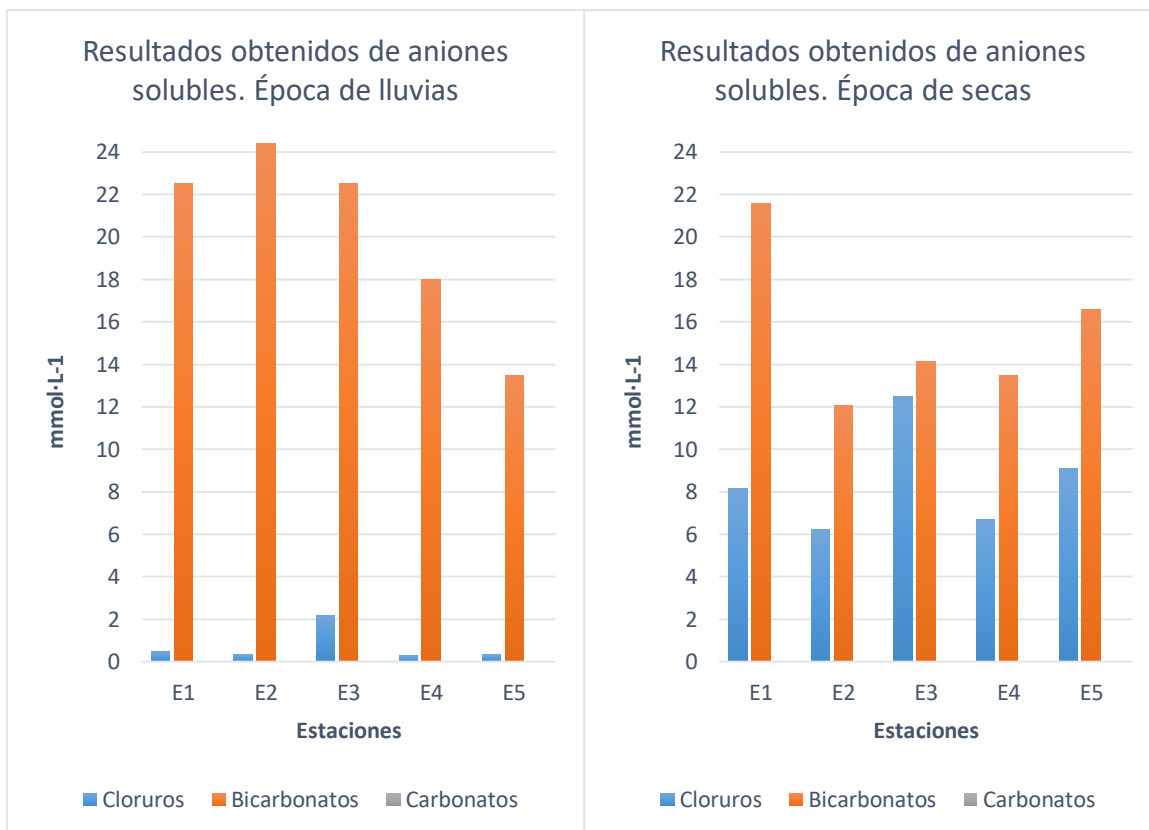


Figura 15. Comparación de los resultados de aniones solubles en el extracto de saturación de las cinco estaciones de muestreo

En la Figura 15 se puede observar que los resultados de cloruros fueron mayores en la época de secas, mientras que en los de bicarbonatos se obtuvieron mayores resultados en la época de lluvias y de acuerdo a Espinosa, *et al.*, (1999) la presencia de bicarbonatos en el suelo indica un aporte de iones H^+ que reducen el pH, además los HCO_3^- se combinan fácilmente con los cationes básicos lavándolos del perfil, promoviendo la acidez del suelo, y se puede observar en los resultados de pH que se obtuvieron valores más ácidos en la época lluviosa. Además, Espigares (1985) mencionó que los cloruros se pueden considerar como un indicador indirecto de contaminación fecal.

3.1.15. Resultados de color del suelo

En el Cuadro 18 se muestran los resultados de la coloración que presentó cada muestra al analizarla como suelo seco y húmedo, las cuales fueron comparadas con las tablas de color de Munsell.

Cuadro 18. Resultados de color del suelo				
	Época de lluvias		Época de secas	
	S*	H*	S	H
E1	Marrón grisáceo oscuro	Marrón muy oscuro	Marrón grisáceo	Marrón muy oscuro
E2	Marrón grisáceo oscuro	Marrón muy oscuro	Marrón grisáceo	Marrón muy oscuro
E3	Marrón grisáceo	Negro	Marrón grisáceo oscuro	Negro
E4	Marrón grisáceo	Negro	Marrón grisáceo	Marrón muy oscuro
E5	Marrón grisáceo	Negro	Marrón grisáceo	Marrón grisáceo muy oscuro

*S: Muestra seca

*H: Muestra húmeda

De acuerdo con los resultados obtenidos en la determinación de color del suelo podemos observar que la mayoría de las estaciones presentan coloraciones marrones a negras, lo cual, de acuerdo con Ramírez, (1997) comúnmente significa acumulación de materia orgánica y a su acumulación progresiva en el perfil (Rucks, 2004), como en la estación 3 de ambas épocas donde se obtuvieron los colores más oscuros y con mayor contenido de materia orgánica (Figura 7). Además, como mencionó Espigares, (1985) las aguas residuales urbanas suelen tener coloraciones gris o pardo, pasando a color negro por los procesos anóxicos, las cuales al bañar los suelos de la ribera pueden conceder esta coloración al mismo.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A partir de los resultados obtenidos en esta investigación mediante el análisis de las muestras de suelo de la región de Coronango, Puebla y su posterior interpretación para evaluar el efecto que tiene el agua contaminada del río Prieto en los suelos de la ribera, se llegó a las siguientes conclusiones.

- El agua contaminada y las descargas de aguas residuales urbanas que se arrojan al río están afectando a los suelos de la ribera, causando drásticas alteraciones en las características físicas como densidad y porosidad de los suelos; y en las propiedades químicas como pH, conductividad, materia orgánica, nitrógeno total, cationes intercambiables y boro. Como se pudo observar en la estación 3.
- La comparación de los resultados obtenidos entre ambas épocas de muestreo sugirió que la ausencia de lluvias concentró a los contaminantes apreciándose con más facilidad el efecto de la descarga de aguas en el suelo de la estación 3 donde se observaron notables cambios en la época de secas en parámetros como materia orgánica, nitrógeno, CICT, cationes intercambiables, conductividad y aniones solubles.
- Los metales pesados biodisponibles se encontraron en el siguiente orden de concentraciones $Cd < Hg < Pb < Cu < Fe$. Todos los metales analizados en los suelos de la ribera se encontraron dentro de los niveles normales y la descarga de aguas residuales al río no representó un aporte importante de metales a los suelos de las riberas pues no se observaron variaciones significativas en la estación donde se encuentra dicha descarga.
- Sin embargo, la presencia de metales pesados en los suelos de la ribera es un indicador de su presencia en el agua del río, por lo que si el agua se ocupa para riego o actividades recreativas puede representar un riesgo para la salud debido a que los metales pesados son bioacumulables, no son biológicamente degradables y se introducen fácilmente en la cadena trófica.
- Es necesario crear programas de educación ambiental donde: se identifiquen los principales problemas ambientales que afectan a la comunidad de

Coronango y sus posibles soluciones; se incentive a la población a una buena gestión de los residuos generados en casa, esto resultaría en la disminución de desechos lo que a su vez disminuiría los residuos sólidos que se arrojan al río; se sensibilice a los habitantes para que permitan la realización de estudios ambientales dentro del municipio.

- Con el objetivo de determinar el efecto ambiental que ocasiona el agua contaminada del río Prieto, se sugiere realizar estudios adicionales en el agua del río y suelos de cultivo aledaños.

BIBLIOGRAFÍA

- Abrol, I; Yadav, J; Massoud, F. (1998). *FAO. Salt affected soils and their management.* Obtenido de FAO: <http://www.fao.org/3/x5871e/x5871e00.htm#Contents>
- Aguilera, N. y Domínguez, I. (1984). *Metodología de análisis físico-químicos de suelos.* Universidad Nacional Autónoma de Chapingo. México.
- Arias Jiménez, A. C. (2001). *Suelos Tropicales.* San José, Costa Rica: Universidad Estatal a Distancia.
- A.O.A.C. (1980). *Official methods of analysis of the Association of Official agricultural chemists.* (13th ed.).
- Bautista Cruz, A; Etchevers Barra, J; del Castillo, R; Gutiérrez, C. (2004). *La calidad del suelo y sus indicadores.* *Ecosistemas* 13 (2): 90-97
- Bautista Zúñiga, F. (1999). *Introducción al estudio de la contaminación del suelo por metales pesados.* Yucatán, México: Ediciones de la Universidad Autónoma de Yucatán.
- Bosch, Matías; Costa, José; Cabria, Néstor y Aparicio, Virginia. (2012). *Relación entre la variabilidad espacial de la conductividad eléctrica y el contenido de sodio del suelo.* *Ciencia del suelo* 30(2): 95-105.
- Casanova, E. (2005). *Introducción a la ciencia del suelo* (Segunda ed.). Venezuela: Universidad Central de Venezuela. Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico.
- Chiossi, N. (1975). *Geología aplicada a Engenharia.* Sao Paulo: Gremio Politécnico.
- Cifuentes, J. y Plazas, C. (2017). *Susceptibilidad a la erosión de los suelos ribereños del río Magdalena mediante análisis geológico y geotécnico – área urbana de Neiva.* Obtenido de Repositorio Institucional Universidad de La Salle: http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/21732/40121079_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- CONAGUA. (2004). *Situación de los recursos hídricos. En Estadísticas del agua en México.* CONAGUA. México:22-50.
- Crespo Villalaz, C. (2004). *Mecánica de suelos y cimentaciones* (Quinta ed.). México: Limusa.
- D.O.F. (2000). NOM-021-SEMARNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. estudio, muestreo y análisis.
- Doménech, X., y Peral, J. (2006). *Química ambiental de sistemas terrestres.* Barcelona, España: Editorial Reverté.

- Espigares, M. y Pérez, J. (1985). *Aspectos sanitarios del estudio de las aguas*. Universidad de Granada. Servicio de Publicaciones. Granada.
- Espinosa, J. y Molina, E. (1999). *Acidez y encalado de los suelos*. Costa Rica. IPNI.
- Flores, J; López-Moreno, S y Albert, L. (1995) *La contaminación y sus efectos en la salud y el ambiente*. Centro de ecología y desarrollo, A.C., México, DF.
- Gaona, Xavier. (2004). *El mercurio como contaminante global, desarrollo de metodologías para su determinación en suelos contaminados y estrategias para la reducción de su liberación al ambiente*. Obtenido de Tesis Doctorales en Xarxa: <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/3174/xgm1de1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- García, I. y Dorronsoro, C. (2005). *Contaminación del suelo*. En: Tecnología de suelos. Universidad de Granada. Departamento de Edafología y Química Agrícola.
- González, F., Domínguez, M., Cruz, K., y Arriaga, J. (2011). *Identificación de estudios y proyectos del sector hídrico; Oaxaca, Puebla y Tlaxcala*. Obtenido de Red del Agua UNAM: http://www.agua.unam.mx/padhpot/assets/cdh/generales/IdentificacionOaxPueTlax_11.pdf
- Graetz, H. (1992). *Suelos y Fertilización* (2 ed.). México: Trillas: SEP.
- H. Ayuntamiento de Coronango. (s.f.). *Coronango*. Obtenido de Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal: <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM21puebla/municipios/21034a.html>
- Hernández V, Nélida. (2018). *El río y su territorio. Espacio de libertad: un concepto de gestión*. Obtenido de Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe: <https://www.redalyc.org/jatsRepo/721/72157132006/html/index.html>
- Hernández, Janette. (2012). *Especiación de metales pesados contaminantes en los suelos y acuífero del río de los remedios*. Obtenido de Repositorio Digital IPN: <https://www.repositoriodigital.ipn.mx/bitstream/123456789/16244/1/Tesis%20520Janette%2520IPN.pdf>
- Ibáñez, G. (2012). *Elaboración de un plan de manejo ambiental para la conservación de la subcuenca del río San Pablo en el cantón de la Maná, provincia de Cotopaxi*. Latacunga, Ecuador.
- Infoagro. (2012). *El boro en el suelo*. Obtenido de InfoAgro: <https://mexico.infoagro.com/el-boro-en-el-suelo/>

- Kabata-Pendias, A. y Pendias, H. (1992) *Trace Elements in Soils and Plants*. 2nd Edition, CRC Press, Boca Raton.
- Kass L., D. (1996). *Fertilidad en suelos*. San José, Costa Rica: Universidad Estatal a Distancia.
- Lafuente, D. A. (2001). *Avances en seguridad alimentaria*. (M. Velázquez, Ed.) Vigo, España: Altaga.
- Maderey, R. L. (2005). *Geografía para el siglo XXI: Principios de hidrogeografía. Estudio del ciclo hidrológico*. México: Textos Universitarios.
- Mantilla, Eduardo; Vergel, Crisanto y López, José. (2005). *Medición de la sostenibilidad ambiental*. Universidad Cooperativa de Colombia. Colombia.
- Martín Vide Juan P. (2002). *Ingeniería de ríos*. Ediciones UPC, Barcelona 2002. ISBN: 84-8301-563-3. 25-45.
- Martínez León, Jesús. (2015). *Priorización de actuaciones medioambientales de ríos con entornos urbanos*. Obtenido de Repositorio Institucional de la Universitat Politècnica de Valencia: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/61443/MART%C3%8DNEZ%20-%20Priorizaci%C3%B3n%20de%20actuaciones%20medioambientales%20de%20r%C3%ADos%20con%20entornos%20urbanos.pdf?sequence=1>
- Martínez, A; Fonseca, K; Ortega, J; García-Luján, C. (2009). *Monitoreo de la calidad microbiológica del agua en la cuenca hidrológica del Río Nazas, México*. Química viva, (8). Obtenido de Redalyc: <http://www.redalyc.org/pdf/863/86311258005.pdf>
- Martínez, M. J., Pérez, C., Tudela, M. L., Molin, J., Linares P., Navarro, C., Vidal, J., Barberán, R., Mantilla, W., Tovar, P. J., Solano, A. M., Marimón, J., Agudo, I., Hernández, C. (2005). *Desertificación: Monitorización mediante indicadores de degradación química. Programa de iniciativa comunitaria INTERREG IIIB ESPACIO MEDOCC. Proyecto Desernet. Acción piloto Región de Murcia*. Ed. Consejería de Agricultura, Agua y Medio Ambiente.
- Mena, M. (6 de Julio de 2017). *Tiene Puebla cuatro de los ríos más contaminados de todo México*. Obtenido de Agua.org.mx: [tps://agua.org.mx/puebla-cuatro-los-rios-contaminados-mexico/](https://agua.org.mx/puebla-cuatro-los-rios-contaminados-mexico/)
- Muñoz Iniestra, D., Soler Aburto, A., López Galindo, F. y Hernández Moreno, M. (2015). *Edafología. Manual de métodos de análisis de suelos*. (1a ed.) México: FES Iztacala, UNAM.

- Navarro Blaya, S., y Navarro García, G. (2013). *Química Agrícola: El suelo y los elementos químicos esenciales para la vida* (3a ed.). Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.
- Núñez Solís, J. (2000). *Fundamentos de Edafología* (Tercera ed.). San José, Costa Rica: Editorial EUNED.
- Núñez Solís, J. (2001). *Manejo y conservación de suelos*. Costa Rica: Universidad Estatal a Distancia.
- Orden Jurídico Poblano. (2018). *Programa Municipal de Desarrollo Urbano Sustentable de Coronango*. Puebla, Puebla, México.
- Padilla Reyes, Diego. (2014). *Procesos hidrogeoquímicos que dan origen a la salinidad en el sistema acuífero de Tierra Nueva, San Luis Potosí*. Obtenido de Repositorio Institucional de CICESE: <https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1007/927/1/235211.pdf>
- Pagnanelli, F., Moscardini, E., Giuliano, V., Toro, L. 2004. *Sequential extraction of heavy metals in river sediments of an abandoned pyrite mining area: pollution detection and affinity series*. Environmental Pollution, 132, pp. 189-201.
- Porta, J., López Acevedo, M., y Roquero, C. (2003). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente* (3 ed.). Barcelona, España: Ediciones Mundi-Prensa.
- Porta, J., López Acevedo, M., Roquero, C. 1994. *Degradación de suelos y calidad ambiental*. En: *Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente*. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. 807 pp.
- Ramírez, D. y Pardo, L. (2018). *Estudio geomorfológico y de resistencia a la erosión fluvial del suelo en el río Guaviare, tramo: río Inirida y río Atabapo*. Universidad de la Salle. Colombia.
- Ramírez, Roberto. (1997). *Propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos*. Santa fe de Bogotá, DC. Produmedios.
- Richards, L.a. (1954). *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils* USDA Agricultural Handbook No. 60. U.S. Department of Washington D.C. USA.
- Rico Rodríguez, A., y Del Castillo, H. (2001). *La ingeniería de suelos en las vías terrestres: carreteras, ferrocarriles y aeropistas* (Vol. 1). México: Limusa.
- Rioja Molina, A. (2002). *Apuntes de Fitotecnia general*. Ciudad Real, España: E.U.I.T.A.
- Rodríguez Barreira, S. (2008). *Crecimiento del arbolado, producción de pasto y efectos edáficos en sistemas silvopastorales fertilizados con lodos de*

- depuradora, efecto residual.* España: Universidad de Santiago de Compostela.
- Rucks, L; García, F; Kaplán, A; Ponce de León, J; Hill, M. 2004. *Propiedades físicas del suelo.* Facultad de agronomía, universidad de la república. Montevideo-Uruguay.
- SEMARNAT. (2017). *¿Y el medio ambiente? Problemas en México y el mundo.* Obtenido de SEMARNAT: <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Cig/libros2009/CG007297.pdf>
- Seoánez Calvo, M. (1999). *Contaminación del suelo: estudios, tratamiento y gestión.* Colección de ingeniería del medio ambiente. España: Ediciones Mundi-Prensa.
- Siebe, C., Jahn, R., y Stahr, K. (1996). *Manual para la descripción y evaluación de suelos en el campo.* México: Instituto de geología, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Smith, D. H., Sims, B. G., y O'Neil, D. H. (1994). *Principios y prácticas de prueba y evaluación de máquinas y equipos agrícolas.* Boletín de servicios agrícolas de la FAO 110, Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación, Roma.
- Solano, Antonia. (2005) *Movilización de metales pesados en residuos y suelos industriales afectados por hidrometalurgia del cinc.* Murcia, España.
- Stanley, E. M. (2007). *Introducción a la química ambiental.* D.F, México: Editorial Reverté.
- Thompson, L., y Troeh, F. (1998). *Los suelos y su fertilidad.* España: Reverté.
- Toledo, Alejandro. (2002). *El agua en México y el mundo.* Gaceta Ecológica, (64). Obtenido de Redalyc: <http://www.redalyc.org/pdf/539/53906402.pdf>
- Tschebotarioff, G. P. (1979). *Foundations: Retaining and Earth Structures: The Art of Design and Construction and its Scientific Basis in Soil Mechanics.* McGraw-Hill.
- Twardowska Irena, Allen Herbert E., Häggoblom Max M. (2006). *Soil and Water Pollution Monitoring, Protection and Remediation.* Ed. Springer. The Netherlands.
- UNESCO. (2003). *Agua para todos, agua para la vida.* Resumen. Informe de las Naciones Unidas para el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo. París: UNESCO-WWAP.

- UNESCO. (2006). *El agua: una responsabilidad compartida*. 2do. Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el mundo Resumen Ejecutivo. París: UNESCO-WWAP.
- Vázquez, Antonio. (1999). *Guía para interpretar el análisis químico del agua y suelo*. Universidad Autónoma de Chapingo, México.
- Villalba, A., del Castillo, J., Gómez, A., Pérez, A., Nubes, G., Villalba, S., y Salcido, A. (2013). *Contaminación del agua y suelo en el ecosistema río Agua Prieta, Sonora, México*. Revista de Ciencias Biológicas y de la Salud, 3-11.
- Welcomme, R. L. (1980). *Cuencas fluviales*. Obtenido de Depósito de documentos de la FAO: <http://www.fao.org/3/X6853S/X6853S00.htm#indice>
- Wild, A. (1992). *Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según Russel*. Madrid, España: Ediciones Mundi-prensa.
- Worthen, E. L. (1949). *Suelos agrícolas: Su conservación y fertilización*. U.T.E.H.A. México. 463 p.